



**ANÁLISIS Y ESTUDIO PARA ALIMENTAR HIDROELÉCTRICA DEL
GUAVIO A PARTIR DE UN LAGO ARTIFICIAL**

**KAREN XIOMARA GUTIERREZ HERNÁNDEZ
BENJAMIN ALEXANDER FRANCO SALAZAR**

**Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD DE TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ, D. C.
2019**



**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

TÍTULO DEL PROYECTO:

**ANÁLISIS Y ESTUDIO PARA ALIMENTAR HIDROELÉCTRICA DEL
GUAVIO A PARTIR DE UN LAGO ARTIFICIAL**

**MODALIDAD
VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL
CIUDAD DE PANAMÁ**

**NOMBRE: KAREN XIOMARA GUTIERREZ HERNÁNDEZ – BENJAMIN
ALEXANDER FRANCO SALAZAR CÓDIGO: 504580 - 502309**

**DOCENTE ASESOR:
NOMBRE: Henry Alberto Córdoba**

**BOGOTÁ, D.C., 28 DE 10
DE 2019**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

PERIODO 2019-3

PROGRAMA ACADÉMICO: INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIANTE. Karen Xiomara Gutiérrez Hernández **CÓDIGO** 504580

ESTUDIANTE. Benjamín Alexander Franco Salazar **CÓDIGO** 502309

DIRECTOR SUGERIDO: Ing. Henry Córdoba

ALTERNATIVA Análisis y estudio de la construcción de un lago artificial para mitigar el bajo nivel de agua de la hidroeléctrica del Guavio

VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL

LUGAR DE LA VISITA: Ciudad de Panamá

DURACIÓN Y FECHAS DE LA VISITA: 8 días, del 13 al 20 de agosto de 2018

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES	18
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	18
1.1.1. PREGUNTA PROBLEMA	18
1.2. JUSTIFICACIÓN	19
1.3. ANTECEDENTES	20
1.3.1. Estado actual:	21
1.3.2. Lagos artificiales	21
1.4. MARCO DE REFERENCIA	23
1.4.1. MARCO TEÓRICO	23
1.4.1.1. Lagos artificiales	23
1.4.1.2. Hidroeléctrica el Guavio	23
1.4.1.3. Hidroeléctrica de embalse	25
1.4.1.4. Lago Gatún	26
1.4.2. MARCO CONCEPTUAL	27
1.5. OBJETIVOS	28
1.5.1. General	28
1.5.2. Específicos	28
1.6. DELIMITACIÓN	29
1.6.1. ALCANCES	29
1.6.2. LIMITACIONES	29

2. METODOLOGÍA	30
2.1. Investigación	30
2.2. Reconocimiento de la zona	30
2.3. Trabajos de campo	30
2.4. Análisis de información	30
2.5. Metodología para la implementación	30
3. RECOPIACIÓN DE DATOS	31
3.1. UBICACIÓN DEL PUNTO	31
3.2. PERFIL TOPOGRAFICO DEL PUNTO	32
3.3. IDEAM	33
3.4. SIAC	34
3.5. NASA	35
4. ANÁLISIS HIDROLÓGICO	36
4.1. LLUVIAS	38
4.2. IDENTIFICACION DE CAUDALES	39
4.3. VERIFICACION DEL SECTOR	39
4.4. ESCORRENTIA SECTOR	40
4.5. HIDROGRAMA	49
4.6. CURVA NÚMERO	52
4.7. CURVA IDF	53
4.8. PERIODO DE RETORNO	63
4.9. ISOYETAS	63
4.10. POLÍGONO DE THIESSEN	64
4.11. BALANCE HÍDRICO	65

4.12.	GENERACION DE CUENCAS	66
4.13.	CURVA DE CALIBRACIÓN	67
4.14.	EVOTRANSPIRACIÓN	68
4.15.	ANALISIS DE CAUDALES	69
4.16.	AJUSTE DE DATOS	70
4.17.	CURVAS DE GASTO	70
4.18.	COTA TOTAL DE SEDIMENTACIÓN	70
5.	ANÁLISIS HIDRÁULICO	70
5.1.	DÉFICIT DE AGUA	71
5.2.	DISEÑO DE TUBERÍA DE LAGO A EMBALSE	71
6.	COMPARACION DEL SISTEMA DEL LAGO GATUN CON SISTEMA A IMPLEMENTAR	74
7.	CONCLUSIONES	75
8.	BIBLIOGRAFÍA	76

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1 Estaciones del Proyecto.....	33
Tabla 2 Subcuencas aferentes al Embalse del Guavio.....	50
Tabla 3 Parámetro CN (SCS) para tierras cultivadas.....	52
Tabla 4 Parámetro CN (SCS) para otras tierras agrícolas	53
Tabla 5 Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF, para Colombia	54
Tabla 6 Balance hídrico del embalse del Guavio	66

CONTENIDO DE ECUACIONES

Ecuación 1	37
Ecuación 2	38
Ecuación 3	38
Ecuación 4	54
Ecuación 5 Curva de Calibración	68

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Esclusas Cocolí	16
Ilustración 2 Esclusas Miraflores.....	16
Ilustración 3 Esclusas de Miraflores.....	16
Ilustración 4 Esclusas Miraflores.....	17
Ilustración 5 Estudiantes Universidad Católica de Colombia	17
Ilustración 6 Represa Del Guavio.....	24
Ilustración 7 Ubicación Represa del Guavio.....	24
Ilustración 8 Ubicación del Proyecto	25
Ilustración 9 Marco conceptual.....	27
Ilustración 10 Perfil.....	32
Ilustración 11 Coordenadas de los puntos extremos de la cuenca	33
Ilustración 12 Mapa de cobertura de vegetación en el proyecto	34
Ilustración 13 Información obtenida por medio de la NASA	35
Ilustración 14 Estaciones climatológicas asociadas al polígono de Thiessen	37
Ilustración 15 Distribución temporal de precipitación estación Potrero Largo	39
Ilustración 16 Delimitación de cuencas aferentes al embalse del Guavio...	40
Ilustración 17 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación AMOLADERO	41
Ilustración 18 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación CLARAVAL	41
Ilustración 19 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación GACHALA	42

Ilustración 20 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación GACHETA	42
Ilustración 21 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación GAMA ..	43
Ilustración 22 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación HATO GRANDE HACIENDA	43
Ilustración 23 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación JUNIN ..	44
Ilustración 24 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación MINAS LAS	44
Ilustración 25 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación POTRERITOS.....	45
Ilustración 26 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación POTRERO LARGO	45
Ilustración 27 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación SUEVA.	46
Ilustración 28 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación TASAJERA	46
Ilustración 29 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación TEMBLADARES	47
Ilustración 30 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación UBALA .	47
Ilustración 31 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación VEGA LA SAN JUAN	48
Ilustración 32 Cuencas aferentes al embalse del Guavio en HEC-HMS	49
Ilustración 33 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación AMOLADERO	51
Ilustración 34 Hidrograma de respuesta para un periodo de retorno de 200 años	51
Ilustración 35 Regiones en Colombia para definición de parámetros a, b, c y d.....	55
Ilustración 36 Curva IDF sintética estación CLARAVAL.....	56

Ilustración 37 Curva IDF sintética estación GACHALA	56
Ilustración 38 Curva IDF sintética estación GACHETA.....	57
Ilustración 39 Curva IDF sintética estación GAMA	57
Ilustración 40 Curva IDF sintética estación JUNIN.....	58
Ilustración 41 Curva IDF sintética estación MINAS LAS	58
Ilustración 42 Curva IDF sintética estación POTRERITOS.....	59
Ilustración 43 Curva IDF sintética estación SUEVA	59
Ilustración 44 Curva IDF sintética estación TEMBLADARES.....	60
Ilustración 45 Curva IDF sintética estación UBALA	60
Ilustración 46 Curva IDF sintética estación AMOLADERO	61
Ilustración 47 Curva IDF sintética estación HATO GRANDE HACIENDA...	61
Ilustración 48 Curva IDF sintética estación POTRERO LARGO	62
Ilustración 49 Curva IDF sintética estación TASAJERA.....	62
Ilustración 50 Curva IDF sintética estación VEGA LA SAN JUAN	63
Ilustración 51 Isoyetas generadas por el programa ArcGIS	64
Ilustración 52 Estaciones aferentes al proyecto con el polígono de Thiessen	65
Ilustración 53 Cuencas generadas por el programa ArcGIS	67
Ilustración 54 Valores de Evapotranspiración	69
Ilustración 55 Caudal y presión aguas abajo en el embalse del Guavio	72
Ilustración 56 Caudal y presión aguas abajo en el embalse del Guavio	73
Ilustración 57 Lago artificial para alimentar al embalse del Guavio.....	73

INTRODUCCIÓN

El canal de Panamá es una gran vía que conecta el océano Pacífico con el océano Atlántico, que se creó con el fin de conectar estos dos océanos y poder hacer más cortos los recorridos de los barcos. Al ver el nivel de crecimiento que estaba teniendo, evidenciaron la necesidad de hacer más grande el canal, de modo que decidieron crear el lago Gatún, el cual es un lago artificial, que en su momento fue el más grande del mundo, y cuya función es servir como reservorio para las esclusas del canal, siendo este muy importante para el canal debido a que sirve como vía para el tránsito de los barcos. ¹

Con base a la visita a Ciudad de Panamá, donde se conoció dicho canal, se logró conocer y entender su funcionamiento y la forma en que se alimenta este para poder cumplir con todo el proceso que se necesita para el óptimo funcionamiento. Tal como se mencionó anteriormente, el canal es alimentado por parte del lago Gatún que se diseñó y creó con este fin. Para poder realizar su función de alimentar de agua al Canal, el lago tiene un ciclo en el cual el líquido contenido en él se traspasa al canal, en donde este a través de las compuertas y represas vuelve al lago, de esta manera se repite el ciclo.²

Con estos conocimientos se pretende hacer un análisis y estudio para alimentar la hidroeléctrica ubicada en el Guavio a través de un lago artificial con funcionamiento similar al Gatún y de esta manera alargar la vida útil de la hidroeléctrica en mención, debido a la importancia que representa para Colombia, puesto que es una de las más grandes del país y alimenta a gran parte del territorio.

¹ CANAL DE PANAMÁ. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://bit.ly/2GV4Uws>> [Citado: 06 marzo, 2019].

² Ibid.

Ilustración 1 Esclusas Cocolí



Fuente: Propia

Ilustración 2 Esclusas Miraflores



Fuente: Propia

Ilustración 3 Esclusas de Miraflores



Fuente: Propia

Ilustración 4 Esclusas Miraflores



Fuente: Propia

Ilustración 5 Estudiantes Universidad Católica de Colombia



Fuente: Propia

1. GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

En la visita técnica de Panamá pudimos observar los diferentes usos del lago artificial Gatún, su constante flujo de agua dulce para el abastecimiento del canal nos hizo preguntarnos; ¿qué uso podríamos darle a construcción similar en Colombia?, Luego de pensar y analizar encontramos una posible utilidad para lo visto en la visita: La hidroeléctrica del Guavio la cual fue diseñada con una vida útil de 45 años a 60 años, esta comenzó su funcionamiento en el año 1992 y proyectan unos 18 años de vida útil.

En tiempos de sequía el nivel de agua del embalse baja y por tanto la producción de energía no es la óptima, así que para garantizar que la producción de la Hidroeléctrica esté al 100%, nos planteamos utilizar lo visto en la visita técnica y lo desarrollaremos un análisis y estudio para alimentar la hidroeléctrica del Guavio a partir de un lago artificial.

1.1.1. PREGUNTA PROBLEMA

¿Es viable la construcción de un lago artificial para alimentar el embalse de la hidroeléctrica del Guavio, aplicando las tecnologías vistas en la visita técnica de Panamá?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Debido a que el Guavio no cuenta con un sistema que garantice la producción máxima de energía para la que fue diseñada la Hidroeléctrica, sobre todo en tiempos de sequía donde baja el nivel del embalse, se desea plantear la implementación de un lago artificial que alimente constantemente el embalse de la Hidroeléctrica del Guavio. Esta hidroeléctrica es la segunda hidroeléctrica más grande del país y genera gran parte de la energía para su funcionamiento.

Según Ronald Arana (1997), queda corto tiempo de vida útil a la hidroeléctrica debido a que esta fue diseñada para una vida útil de 45 a 60 años, pero por la gran cantidad de sedimentos que llegan a esta tendría una vida útil de 30 a 35 años. Es decir, le quedan 8 años de vida útil. Por lo anterior, se hace necesario evaluar la opción de empezar a alimentar este por medio de un lago artificial para poder alargar su vida útil.³

³ ARANA, Ronald. Las herencias del Guavio. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://bit.ly/2FEExHP>> [Citado: 18 marzo, 2019].

1.3. ANTECEDENTES

En Colombia en el año 1985 Santiago Samper Brush compró la hacienda “El Charquito” en Soacha donde se construyó la primera Hidroeléctrica del país. Se han construido 33 Hidroeléctricas las cuales producen 19.000 megavatios aproximadamente para el uso del país. Las Hidroeléctricas tienen una vida útil de 30 a 150 años.

Una de las hidroeléctricas más grandes del país es la Hidroeléctrica del Guavio, la cual tiene una capacidad instalada de 1213 MW. Esta capacidad se ve afectada cuando baja el nivel del embalse. Por lo tanto, se desea alimentar la Hidroeléctrica a través de un lago artificial que garantice la producción de energía máxima que puede generar la Hidroeléctrica. Lo anterior, tomando como referencia el lago Gatún ubicado en la ciudad de Panamá que alimenta el canal de dicha ciudad. Este lago tiene un sistema que hace que el agua circule de manera constante por el canal. Adicionalmente, parte de esa agua es utilizada para la venta y de esa forma se generan ganancias para sostenimiento del canal.⁴

Según Ronald Arana (1997) queda corto tiempo de vida útil ya que esta fue diseñada para una vida útil de 45 a 60 años, pero debido a la gran cantidad de sedimentos que llegan a esta se dice que tendría una vida útil de 30 a 35 años lo que quiere decir que le quedan 8 años, por esta razón se quiere implementar la alimentación la hidroeléctrica por medio de un lago artificial, de esta manera alargar su vida útil y optimizar su funcionamiento.⁵

Por tal motivo se ha visto que a nivel mundial de acuerdo a los antecedentes que se mostraran después que los lagos artificiales son sistemas que se han usado para la generación de energía por tal motivo se quiere implementar un lago artificial en la hidroeléctrica del Guavio con el fin de alargar la vida de útil de este

⁴ EFICIENCIA HIDROELÉCTRICAS. La eficiencia técnica como un nuevo criterio de optimización para la generación hidroeléctrica a corto plazo. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://bit.ly/2CPPZjb>> [Citado: 13 marzo, 2019].

⁵ ARANA, Ronald. Las herencias del Guavio. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://bit.ly/2FEExHP>> [Citado: 18 marzo, 2019].

1.3.1.Estado actual: La geomorfología y las características climáticas en el área de influencia del embalse contribuyen a la existencia de un excedente de agua en la región que favorece los niveles óptimos de la operación de la central hidroeléctrica; sin embargo, las fuertes pendientes hacen que las laderas sean altamente susceptibles a la erosión, problemática que ha tenido que enfrentar la empresa, sumada al mantenimiento del galibo del puente que cruza la quebrada La Moncabita, toda vez que esta subcuenca presenta serios problemas de erosión en todo su curso y aporta grandes cantidades de sedimento al embalse. En este sentido, el componente biótico del PMA, obliga a la empresa a adelantar actividades relacionadas con la reforestación y el mantenimiento de los predios en la zona de ronda del embalse el Guavio.⁶

1.3.2.Lagos artificiales : En Chile, la generación de electricidad a través de centrales hídricas cada vez toma más fuerza de norte a sur. Eso nos lleva a tener embalses en zonas con estrés hídrico como el reciente proyecto que pretende construir una central y embalse que utilizará agua de mar que se bombeará a 600 metros de altura.

En los actuales embalses artificiales donde se ha creado una laguna artificial, ha existido un desarrollado acotado de parte de los empresarios locales en torno al turismo con cabañas, restaurantes, y en algunos casos, viñedos experimentales que han tenido excelentes resultados en cuanto al establecimiento de la viña misma.

El impacto de estos espejos de agua en las zonas aledañas entrega una oportunidad única para implementar un desarrollo turístico y agro-vitivinícola que está en ciernes en diversos lagos artificiales, pero que se verá reactivado con este impulso en la construcción de centrales hidroeléctricas.

⁶ EFICIENCIA HIDROELÉCTRICAS. La eficiencia técnica como un nuevo criterio de optimización para la generación hidroeléctrica a corto plazo. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://bit.ly/2CPPZjb>> [Citado: 13 marzo, 2019].

Hablamos de replantar especies nativas que se están extinguiendo o recuperar la agricultura ancestral que se expresa, por ejemplo, en la vitivinicultura a partir de cepas tradicionales que están quedando en segundo plano y que podría ser una actividad económica importante.

Actualmente, en muchos de estos lagos artificiales existe una desarticulación de actividades turísticas y productivas propias del bajo posicionamiento de los sectores, lo que entrega una gran oportunidad para profesionalizar y articular la oferta para atraer nuevos flujos de visitantes e inversionistas interesados en construir emprendimientos, tanto hoteleros como nuevas plantaciones, no tan sólo de viñedos como ocurre en el Lago Colbún, sino también, por ejemplo, plantas cerveceras.⁷

En los embalses artificiales donde se ha creado una laguna artificial, ha existido un desarrollado acotado de parte de los empresarios locales en torno al turismo con cabañas, restaurantes, y en algunos casos, viñedos experimentales que han tenido excelentes resultados en cuanto al establecimiento de la viña misma.

⁷ ESTIMACIÓN EFICIENCIA EMBALSE. Estimación eficiencia de retención del embalse [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2391/Capitulo3.pdf>> [Citado: 20 marzo, 2019]

1.4. MARCO DE REFERENCIA

1.4.1. MARCO TEÓRICO

1.4.1.1. Lagos artificiales

Los lagos, lagunas o embalses de agua suministran beneficios prácticos y estéticos. Desde el punto de vista estético, los lagos revestidos con geomembranas proporcionan un costo efectivo y métodos de calidad en impermeabilizaciones, además de lograr una imagen agradable a la vista, se tiene una obra con un bajo costo tanto en materiales como en mano de obra, además de una vida útil en materiales, que van más allá de los 40 años.

Las geomembranas proporcionan un amplio rango de requerimientos de contención encontrados tanto en campos de golf como en plantas de tratamiento, depósitos de agua y fosas de irrigación. Las geomembranas facilitan sistemas de contención de agua seguros y con una larga vida de trabajo derivado de las excepcionales propiedades del material.⁸

1.4.1.2. Hidroeléctrica el Guavio

El embalse de la hidroeléctrica se alimenta de los ríos Chivor y Batatas 64, desviados mediante dos túneles (uno para cada río) de 2.190 m de longitud y 2.330 m respectivamente, igualmente aprovecha el agua del río farallones y otros afluentes del río Guavio.⁹

La presa es de tipo enrocado con una altura de 243 m que forma un embalse útil de 1.047 millones de metros cúbicos, de los cuales 787 millones son utilizables para la generación. La cota del embalse se sitúa a los 1.630 msnm y el área total inundada fue de 1.344 ha.

⁸ HIDROELÉCTRICAS EN COLOMBIA. Entre el impacto ambiental y el desarrollo. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://bit.ly/2xcJJiS>> [Citado: 08 marzo, 2019].

⁹ MUÑOZ, Nicole, MAYORCA, María. Aplicación de metodologías para la estimación de la eficiencia de atrapamiento de sedimentos en los embalses colombianos: Betania, Miel I y Urrá I [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://bit.ly/2FEExHP>> [Citado: 18 marzo, 2019].

Tiene dos rebosaderos con vertederos de entrada que son controlados por compuertas que permiten el paso del agua a dos túneles, uno de 427 y otro de 461 metros longitud, con una capacidad de 2.100 m³ /s cada uno. La descarga de fondo fue taponada posteriormente al llenado debido a problemas de operación. La bocatoma está ubicada entre las cotas 1.510 y 1.525 msnm y descarga sus aguas en un túnel de carga de aproximadamente 13,5 km y una caída de 515 metros.¹⁰

Las centrales hidroeléctricas de embalse no necesitan combustibles fósiles para generar electricidad, por lo que no incurren en ese costo, no emiten contaminantes a la atmósfera y por lo general pueden permanecer en funcionamiento durante todo el año. En algunos casos, estas pueden ser fuente de suministro de agua para las poblaciones próximas, o servir como protección ante inundaciones.

Ilustración 6 Represa Del Guavio



Fuente: www.skyscrapercity.com

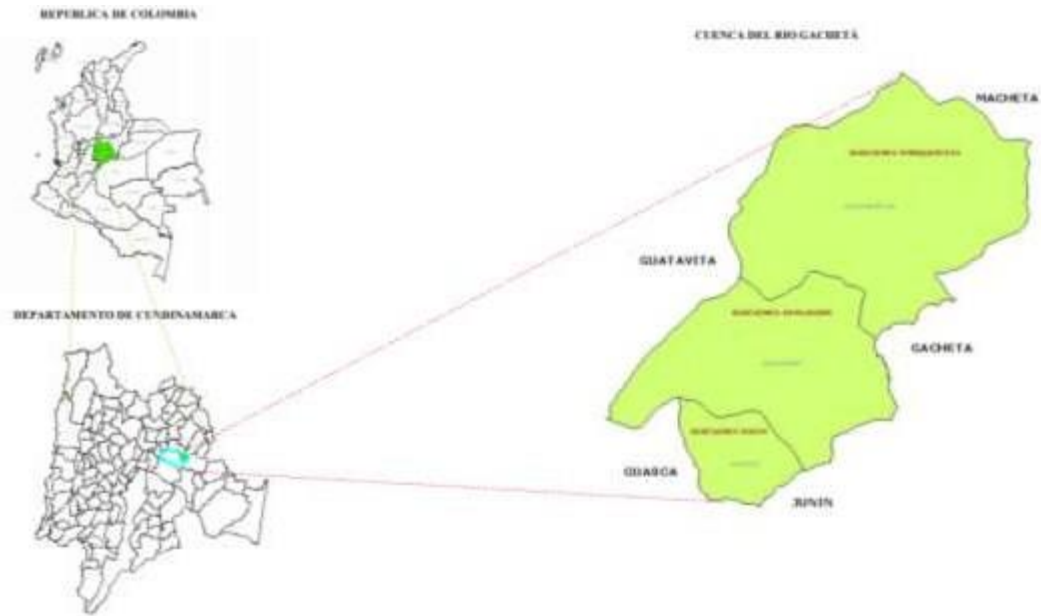
Ilustración 7 Ubicación Represa del Guavio



Fuente: potencialimite.com

¹⁰ HIDROELÉCTRICAS EN COLOMBIA. Entre el impacto ambiental y el desarrollo. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://bit.ly/2xcJJiS>> [Citado: 08 marzo, 2019].

Ilustración 8 Ubicación del Proyecto



Fuente: CAR

1.4.1.3. Hidroeléctrica de embalse

Las centrales hidroeléctricas captan agua y la acumulan de manera natural (lago) o artificial (dique o presa) en un embalse, para aprovechar su energía cinética y una vez utilizado su potencial, el agua es restituida al río.

Las represas, en general, se construyen en el curso de un río, almacenando agua que luego es liberada hacia flujos más estrechos con alta presión. Esta se conduce hacia una turbina conectada a un generador eléctrico transformando parte de la energía mecánica en eléctrica. Finalizado el proceso, el agua es devuelta al río.

Dentro de las centrales de embalse, existen diferentes tipos: se destacan las centrales a pie de presa, por derivación de las aguas, con cámara de carga y las de bombeo o reversibles. Estas últimas son un tipo especial que dispone de dos embalses situados a diferente nivel y funcionan como una central hidroeléctrica convencional cuando la demanda diaria es alta. El agua cae desde el embalse superior haciendo girar las turbinas y queda almacenada en el inferior. Durante las horas del día de menor demanda, el

agua es bombeada al embalse superior para que vuelva a hacer el ciclo productivo.¹¹

1.4.1.4. Lago Gatún

Gran lago artificial localizado en Panamá, y es un elemento clave del canal de Panamá, porque sirve para que transiten los barcos a lo largo de 33 km a través del istmo de Panamá.

Fue creado entre 1907 y 1913 con la construcción de la represa de Gatún sobre el río Chagres. En esos años, el lago Gatún fue el lago artificial más grande del mundo, al igual que su represa.

Tiene una superficie de 436 km², y está situado a 26 m sobre el nivel del mar. Cuando se formó, muchas montañas se convirtieron en islas, destacándose la isla Barro Colorado.

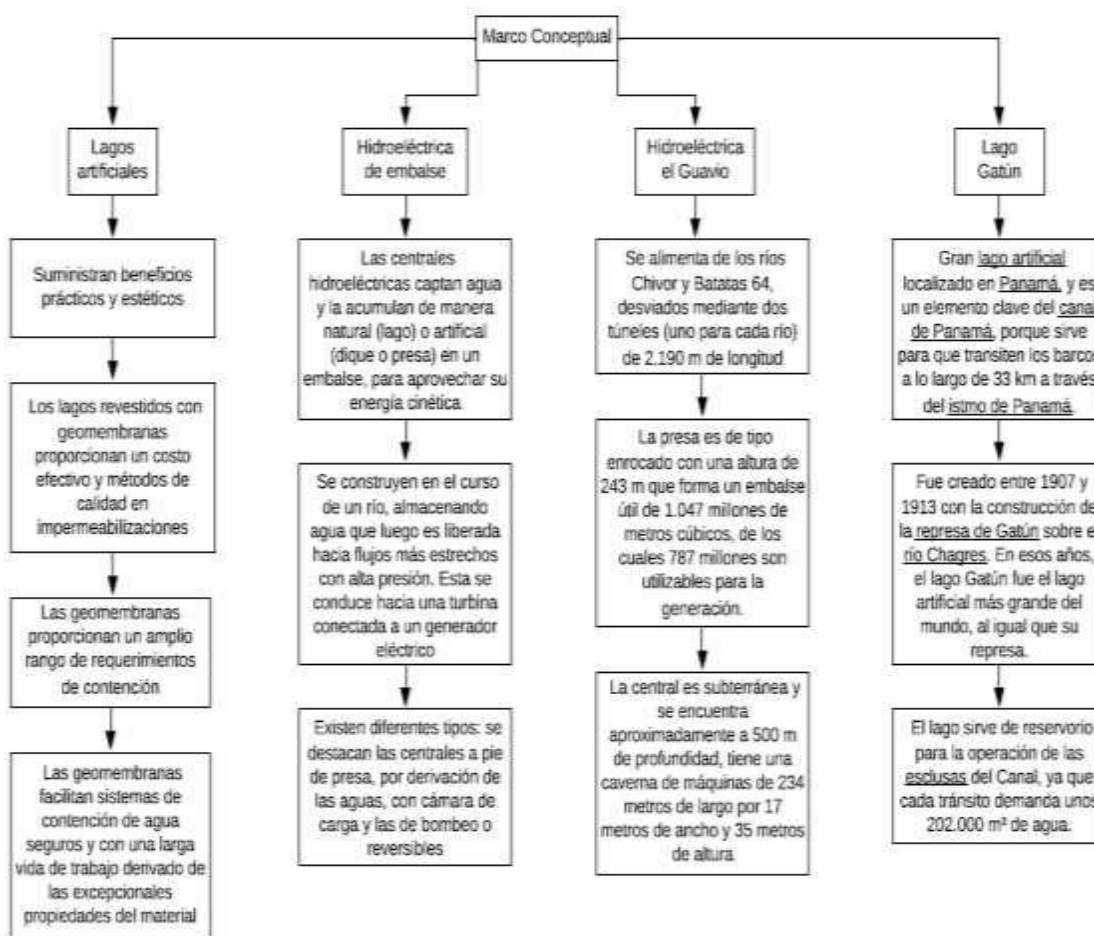
El lago sirve de reservorio para la operación de las esclusas del Canal, ya que cada tránsito demanda unos 202.000 m³ de agua. Bajo el lago Gatún reposa restos de 24 pueblos (entre ellos se pueden nombrar: gatuncillo, Girona y Magacín) los cuales fueron trasladados a diferentes áreas del área del país.¹²

¹¹ FUNCIONES DEL EMBALSE. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://bit.ly/2xcJJiS>> [Citado: 08 marzo, 2019].

¹² LAGO GATÚN. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <https://bit.ly/2JUzclb>> [Citado: 08 marzo, 2019].

1.4.2. MARCO CONCEPTUAL

Ilustración 9 Marco conceptual



Fuente: Propia

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. General

Analizar y evaluar cómo alimentar la hidroeléctrica del Guavio a través de un lago artificial, en base a los conocimientos adquiridos en la visita a Panamá en donde se conoció el funcionamiento del lago Gatún.

1.5.2. Específicos

- Verificación topográfica de la zona aledaña al embalse.
- Revisión hidrológica e hidráulica para la implementación del lago artificial como alimento de la hidroeléctrica del Guavio.
- Ubicación óptima para funcionalidad del lago artificial cerca al embalse.
- Generación de metodología para la implementación del lago artificial.

1.6. DELIMITACIÓN

1.6.1. ALCANCES

Evaluar la viabilidad de implementación de un lago artificial en la hidroeléctrica del Guavio, aplicando las tecnologías observadas en la visita técnica internacional.

1.6.2. LIMITACIONES

El proyecto se limita a un estudio de viabilidad, en el que se evaluará si es factible la implementación del lago artificial que permita garantizar la producción de energía al 100% en la hidroeléctrica del Guavio y alargue su vida útil. Para su evaluación se tendrá en cuenta información existente (Geomorfología, geología, hidrología) y se hará un levantamiento topográfico que permita hacer una identificación de las zonas aledañas al embalse con el fin de establecer el punto óptimo donde se ubicará el lago.

El estudio se limitará a evaluar la viabilidad dado que no se cuenta con ningún lago artificial actualmente en Colombia que alimente una Hidroeléctrica y se requiere como primera medida evaluar si es factible que pueda ser implementado.

Para la investigación se tiene como limitante la escasez de bibliografía como documentos de referencia para nuestra investigación.

2. METODOLOGÍA

2.1. Investigación

Se hizo una investigación de estudios previos a nivel mundial y local sobre el uso de los lagos artificiales.

Se obtuvo la cartografía de la zona cercana al embalse del Guavio. Esta actividad se efectuó en el IGAC.

Se investigó sobre la geomorfología, hidrología e hidráulica de la zona.

2.2. Reconocimiento de la zona

Se realizó una visita técnica de verificación de la zona durante un día. En esta visita se hizo reconocimiento e identificación visual de la hidroeléctrica, zonas del embalse, zonas aledañas.

2.3. Trabajos de campo

Se hizo un levantamiento topográfico de la zona aledaña al embalse. Para esta actividad se contrató una comisión topográfica durante quince días conformada por un topógrafo y dos cadeneros.

2.4. Análisis de información

Se revisó la hidrología, geomorfología e hidráulica de la zona. Lo anterior, es muy importante para la implantación del lago, ya que se trató como una cuenca hidrográfica.

Con la topografía, cartografía, hidráulica e hidrología analizada, se ubicó el punto más adecuado para la implementación del lago artificial.

2.5. Metodología para la implementación

Con la información existente y ubicación del punto óptimo se generó una metodología que describe la mejor forma en la que se puede implementar el lago artificial. Si la implementación no es viable este punto no podrá ser desarrollado.

3. RECOPIACIÓN DE DATOS

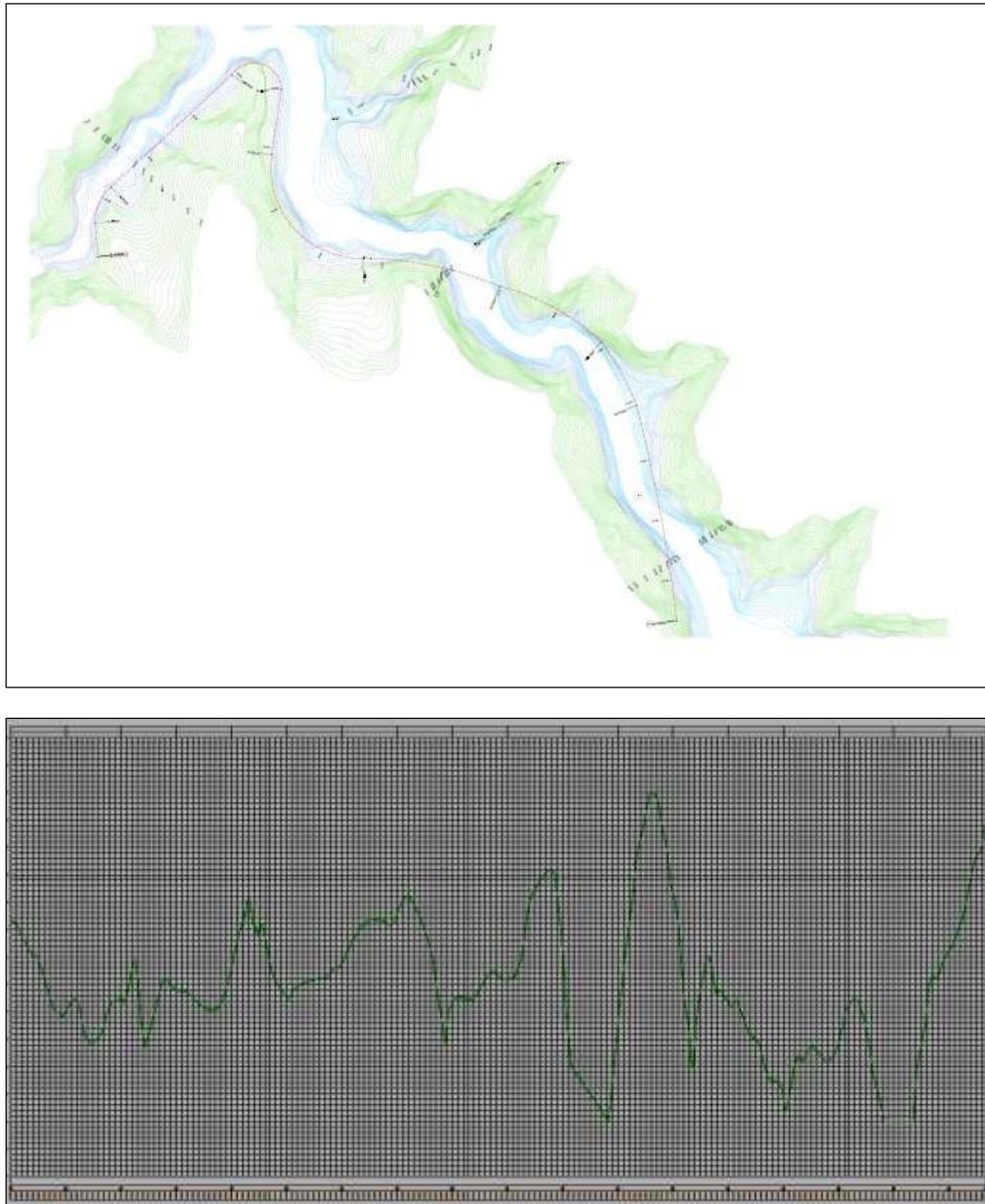
Para realizar el estudio hidrológico e hidráulico del embalse del Guavio, es necesario obtener información que nos ayude a determinar parámetros morfométricos y características de las cuencas, así como información climatológica y de suelo para estimar la escurrimiento de estas. Para la zona se recopiló información de las estaciones climatológicas, mapa de cobertura de suelos, mapa geológico y DEM; la búsqueda de información se realizó en la zona de influencia del proyecto y áreas vecinas con el objeto de lograr una descripción adecuada de las características hidrológicas e hidráulicas. Algunos de las principales fuentes de información se discuten en los ítems siguientes.

3.1. UBICACIÓN DEL PUNTO

Para la ubicación del punto se hizo un levantamiento topográfico con el cual pudimos obtener el punto más alto de terreno para ubicar allí el lago artificial, se ubica en el punto más alto para que llegue el agua del lago a la hidroeléctrica por gravedad, la ubicación del punto se puede observar en el anexo 1.

3.2. PERFIL TOPOGRAFICO DEL PUNTO

Ilustración 10 Perfil



Fuente: Propia

Ilustración 11 Coordenadas de los puntos extremos de la cuenca

Punto	Norte	Este
Norte	1039484.86	1040268.85
Sur	1025259.80	1033881.10
Este	1037145.80	1044548.77
Oeste	1027952.32	1030560.32

Fuente: Car 2019

3.3. IDEAM

La información de precipitación se obtuvo a partir de estaciones del IDEAM, que tuvieran mínimo 30 años de operación, y que en caso tales hayan sido suspendidas. Seguidamente se analiza la información de las estaciones hidrológicas y meteorológicas, se realiza el llenado de datos faltantes y se realizan análisis de consistencia de la información, etc.

En la Tabla 1 Estaciones del Proyecto se muestra las estaciones utilizadas para realizar la caracterización de la cuenca.

Tabla 1 Estaciones del Proyecto

CODIGO	CAT	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	ELEV	LONGITUD	LATITUD
35060210	PM	Claraval	Junin	Cundinamarca	2100	-73.64	4.65
35060130	PM	Minas Las	Gachala	Cundinamarca	23	-73.48	4.68
35060090	PM	Gachala	Gachala	Cundinamarca	1733	-73.52	4.69
35060150	PM	Tembladares	Junin	Cundinamarca	2878	-73.67	4.70
35060120	PM	Vega La San Juan	Gachala	Cundinamarca	1791	-73.47	4.72
35060180	PM	Ubala	Ubala	Cundinamarca	1929	-73.53	4.75
35060240	PM	Gama	Gama	Cundinamarca	2210	-73.61	4.76
35060050	PM	Junin	Junin	Cundinamarca	2323	-73.67	4.79
35060020	PM	Sueva	Junin	Cundinamarca	1965	-73.71	4.81
35060160	PM	Potreros	Guatavita	Cundinamarca	2802	-73.77	4.83
35065010	CO	Gacheta	Gacheta	Cundinamarca	1752	-73.65	4.83
35060200	PM	Amoladero El	Guatavita	Cundinamarca	2963	-73.75	4.86
35060170	PM	Tasajeras	Gacheta	Cundinamarca	2502	-73.60	4.89
21200780	PM	Potrero Largo	Guatavita	Cundinamarca	2780	-73.78	4.93
35070490	PM	Hato Grande Hd	Manta	Cundinamarca	2346	-73.58	4.96

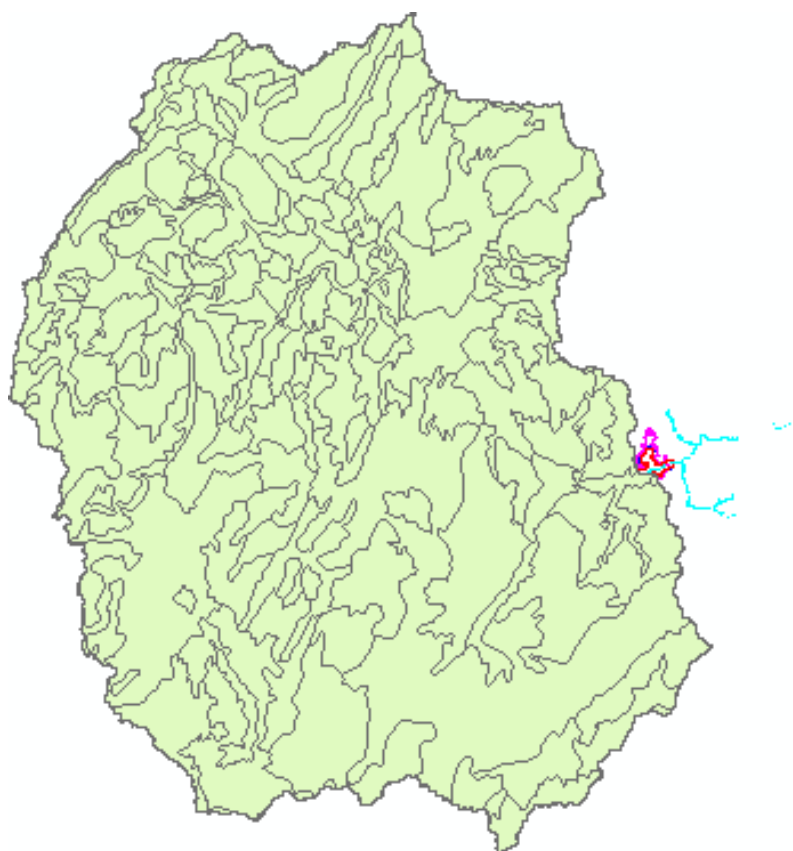
Fuente: Propia Según datos de IDEAM

3.4. SIAC

El mapa de cobertura de suelos es descargado de la página del SIAC, en formato shape (Shp), donde se muestra la cobertura vegetal y cultivos, cuerpos de agua, zona de bosques y actividades antrópicas en todo el país de Colombia.

La información de coberturas presentes en la zona de estudio se presenta en la Ilustración 12 Mapa de cobertura de vegetación en el proyecto.

Ilustración 12 Mapa de cobertura de vegetación en el proyecto



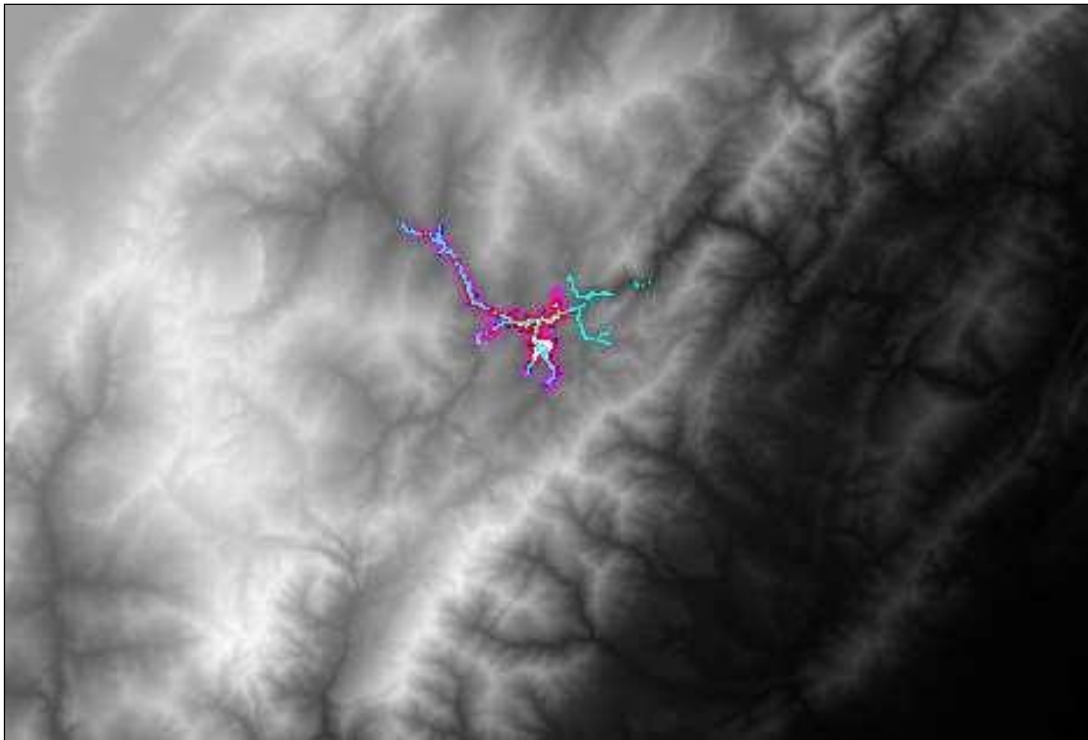
Fuente: Propia

3.5. NASA

El ASTER GDEM, constituye una fuente de información secundaria ampliamente utilizada, la cual se descarga desde la página ASTER GDEM en formato raster, y muestra las elevaciones de la zona de estudio, obtenidas a partir del radiómetro ASTER. Esta información tiene una resolución de 30x30m y es descargada a partir de imágenes individuales que comprenden la zona de estudio, las cuales son incorporadas en una sola imagen satelital con la ayuda de una herramienta computacional ArcGIS.

En la Ilustración 13 Información obtenida por medio de la NASA se puede observar el DEM descargado.

Ilustración 13 Información obtenida por medio de la NASA



Fuente: Propia

4. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

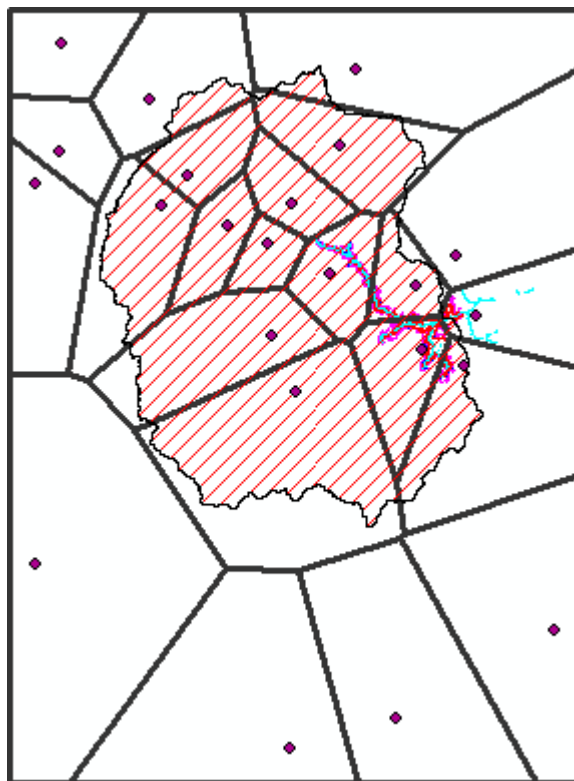
En resumen, la hidrología aquí aplicada, busca estimar el caudal de escorrentía superficial en el embalse del Guavio en un periodo de retorno de 200 años. Estos caudales son utilizados posteriormente en el componente de hidráulico para determinar el diámetro de la tubería que permita, a partir de un lago artificial existente, suplir la necesidad de caudal en los meses que se presente déficit.

La cuenca es el área limitada topográficamente, drenada por un curso de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple localizada en el punto más bajo de la misma. Sus características más importantes son:

- Área de drenaje: Es el área plana.
- Forma de la cuenca: La forma de la cuenca se relaciona con la capacidad de concentración del caudal pico de una creciente.
- Sistema de drenaje: Indica la cantidad de agua en la cuenca y se identifica con la densidad de drenaje.
- Pendiente de la cuenca: Determina la capacidad de concentración de agua y la producción de caudales pico de escorrentía superficial.
- Pendiente del cauce principal: Determina la rapidez de producción del caudal pico de escorrentía superficial.
- Tiempo de concentración: Es conocido como el tiempo necesario para que toda la cuenca aporte al drenaje, o, como el tiempo que se demora el agua más alejada en llegar a la salida de la cuenca. (INVIA, 2009)

La asignación de la precipitación a las cuencas aferentes se efectuó a partir de los polígonos de Thiessen, los cuales permiten asociar estaciones a áreas determinadas con una precipitación determinada como se presenta en la Ilustración 14 Estaciones climatológicas asociadas al polígono de Thiessen.

Ilustración 14 Estaciones climatológicas asociadas al polígono de Thiessen



Fuente: Propia

El tiempo de concentración (T_c) ha sido ampliamente investigado por la comunidad científica, de ahí que se encuentren distintas ecuaciones para estimarlo, y de entre todas ellas se escogió la ecuación propuesta por el Soil Conservation Service (SCS), la cual fue desarrollada a partir de información de cuencas agrícolas en los Estado Unidos, características consideradas similares a las encontradas en la zona de estudio. Esta ecuación se detalla en la Ecuación 1.

Ecuación 1

$$T_c = \frac{\left(\frac{10}{6}\right) L^{0.80} (2540 - 22.86 CN)^{0.70}}{14104 CN^{0.70} S^{0.5}}$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración, en horas (h)

CN: Número de curva del SCS

L: Longitud del cauce principal, en metros (m)

S: Pendiente del cauce principal, adimensional (m/m)

Otros parámetros importantes en este método es el tiempo de desfase y el tiempo pico, definidos a través de la Ecuación 2 y la Ecuación 3, respectivamente.

Ecuación 2

$$\frac{t_i}{t_c} = \frac{6}{10}$$

Donde:

t_i : Tiempo de desfase, en horas (h)

t_c : Tiempo de concentración en horas(h)

Ecuación 3

$$t_p = \frac{10}{9} t_i$$

Donde:

t_p : Tiempo al pico, en horas (h)

Por definición en esta metodología, el tiempo de retardo es el 60% del tiempo de concentración.

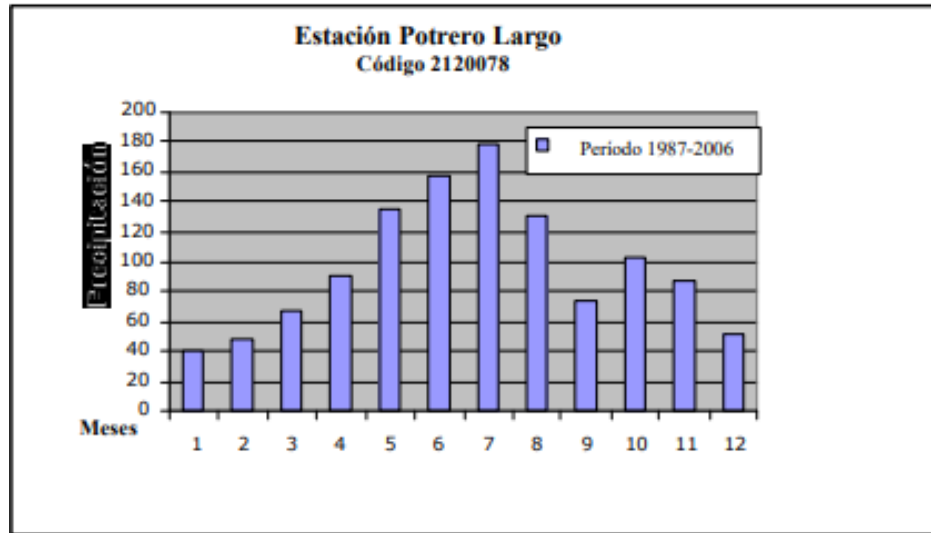
4.1. LLUVIAS

Se tomó como ejemplo de precipitaciones en la zona la

Ilustración 15 Distribución temporal de precipitación estación Potrero Largotomado del documento técnico de la CAR, en el que muestra as variaciones que se presentan en las precipitaciones en la zona.

Para el proyecto se tomaron datos de las estaciones y unos supuestos para estos cálculos los cuales se pueden ver en anexo 4, en el cual los datos se usaron para realizar el balance hídrico.

Ilustración 15 Distribución temporal de precipitación estación Potrero Largo



Fuente: CAR

4.2. IDENTIFICACION DE CAUDALES

La identificación de caudales se hizo mediante los datos arrojados por las estaciones pluviométricas aledañas al embalse del Guavio las cuales están en la Tabla 1 Estaciones del Proyecto, el cálculo de estos se presenta en los anexos 2, 3.

4.3. VERIFICACION DEL SECTOR

Una vez obtenidas las cuencas es necesario realizar una comprobación mediante Google Earth, puesto que, cabe la posibilidad de que existan drenajes que el programa HEC - GeoHMS no realizó al trabajar con el DEM de 30 m x 30 m, y así delimitarlos manualmente y tener un mapa de microcuencas lo más real posible con la mejor información secundaria disponible para la zona de estudio. En la Ilustración 16 Delimitación de cuencas aferentes al embalse del Guavio, se muestra la delimitación de las cuencas aferentes al embalse desde el programa Google Earth.

Ilustración 16 Delimitación de cuencas aferentes al embalse del Guavio



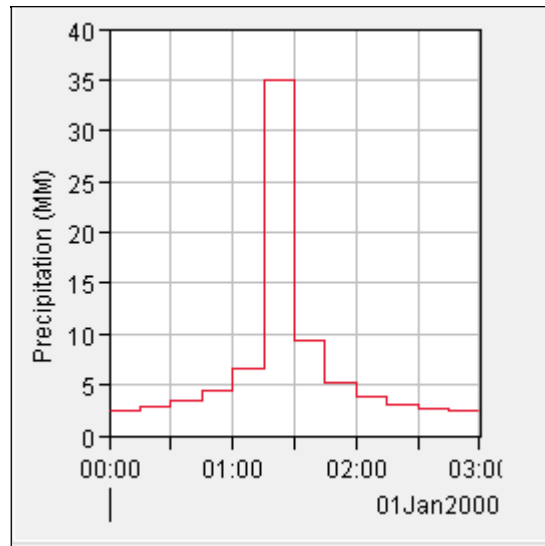
Fuente: Google Earth

4.4. ESCORRENTIA SECTOR

El método utilizado para representar la forma de la tormenta fue el bloque alterno, que consiste en representar el pico de precipitación y/o intensidad de la lluvia en la mitad de la duración de la tormenta y alternar los valores siguientes de precipitación y/o intensidad alrededor de este (Hietograma).

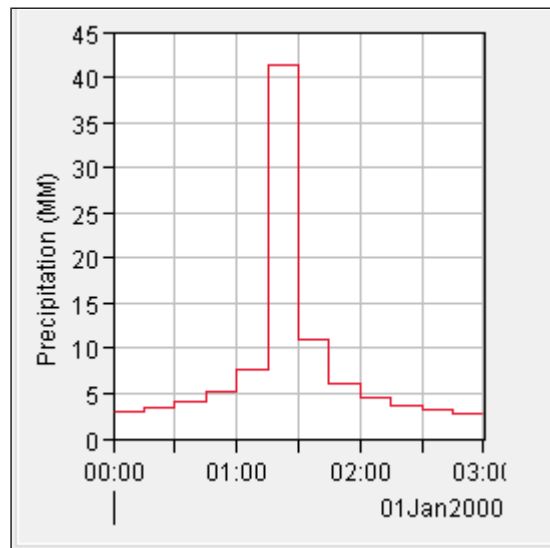
Esta forma de lluvia usualmente genera la mayor respuesta de escorrentía superficial de la cuenca, dado que al presentarse la precipitación pico, el suelo se encuentra ya saturado.

Ilustración 17 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación AMOLADERO



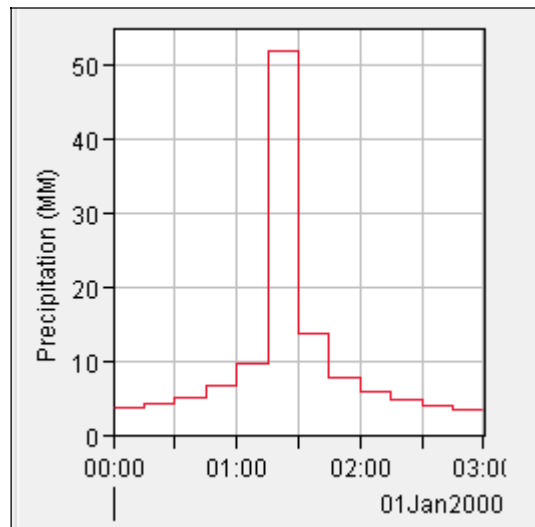
Fuente: Propia

Ilustración 18 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación CLARAVAL



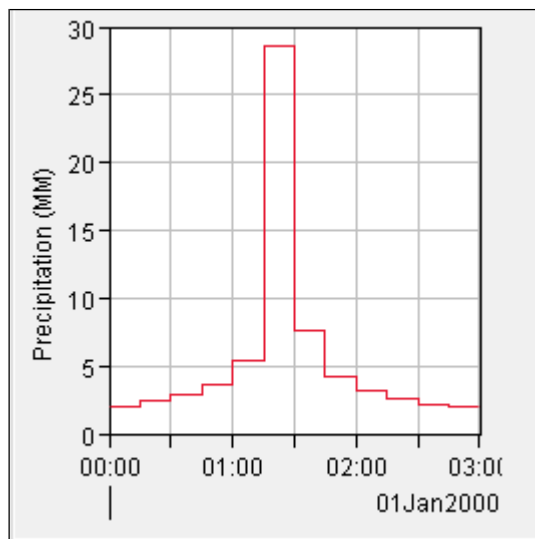
Fuente: Propia

Ilustración 19 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación GACHALA



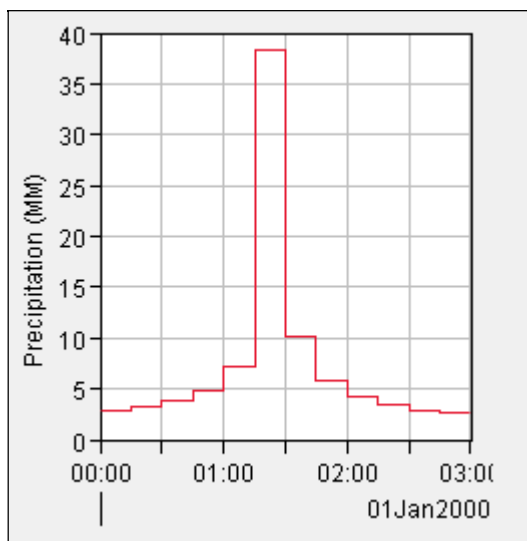
Fuente: Propia

Ilustración 20 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación GACHETA



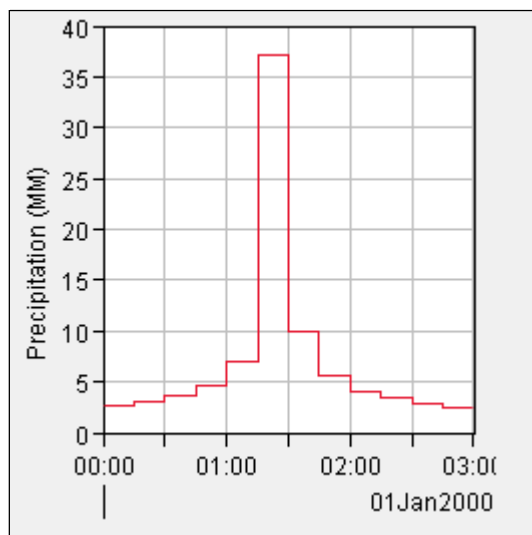
Fuente: Propia

Ilustración 21 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación GAMA



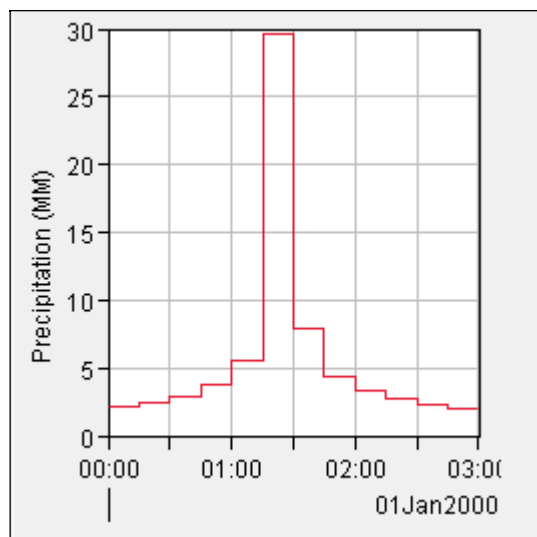
Fuente Propia

Ilustración 22 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación HATO GRANDE HACIENDA



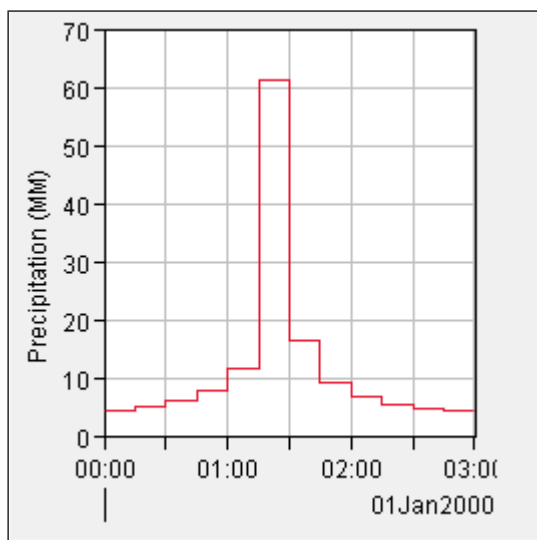
Fuente: Propia

Ilustración 23 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación JUNIN



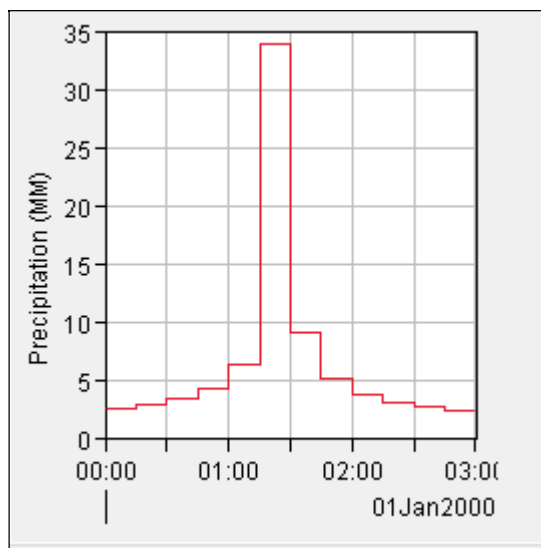
Fuente: Propia

Ilustración 24 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación MINAS LAS



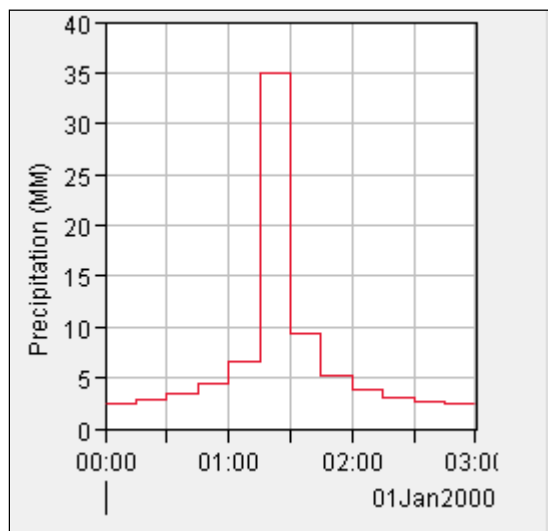
Fuente: Propia

Ilustración 25 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación POTRERITOS



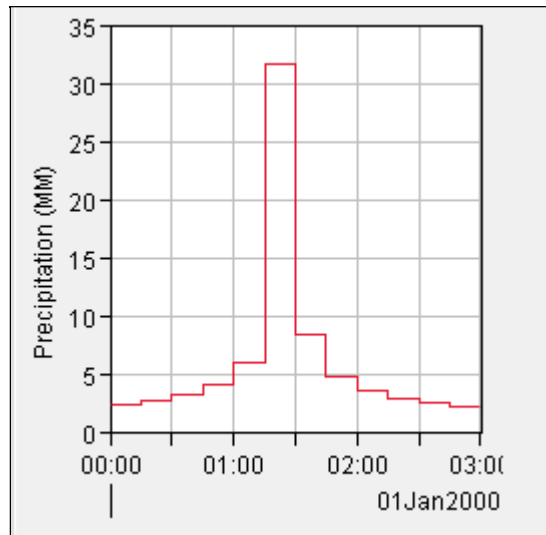
Fuente: Propia

Ilustración 26 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación POTRERO LARGO



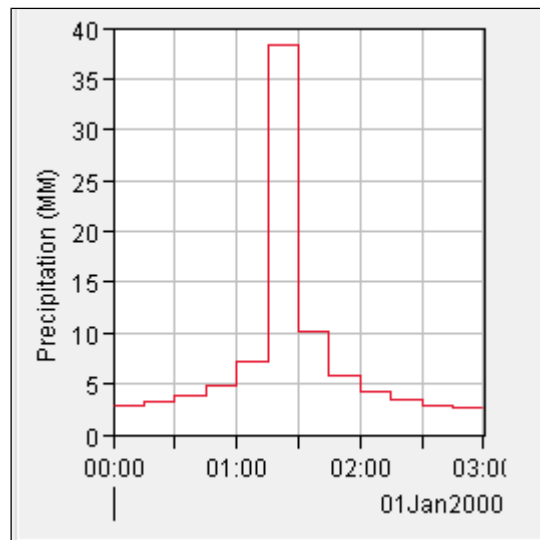
Fuente: Propia

Ilustración 27 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación SUEVA



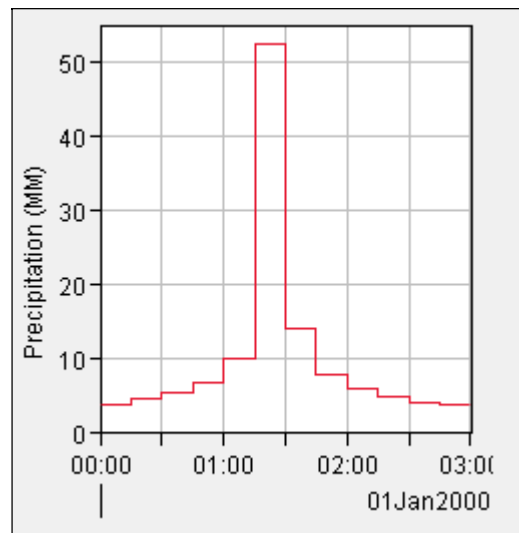
Fuente: Propia

Ilustración 28 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación TASAJERA



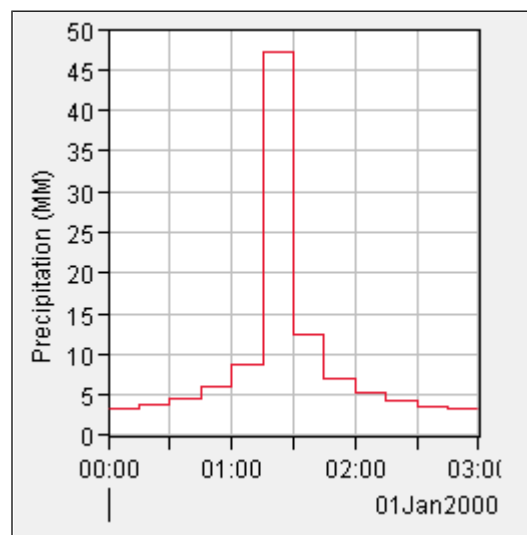
Fuente: Propia

Ilustración 29 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación TEMBLADARES



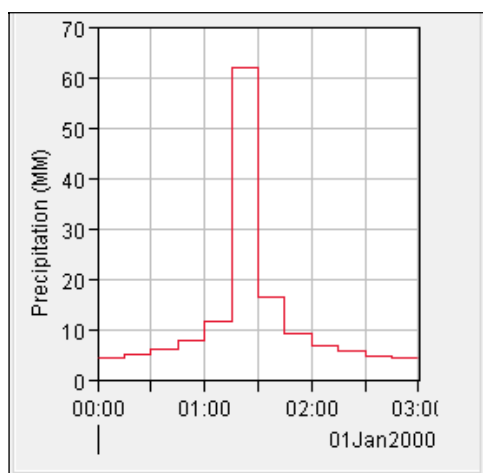
Fuente: Propia

Ilustración 30 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación UBALA



Fuente: Propia

Ilustración 31 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación VEGA LA SAN JUAN



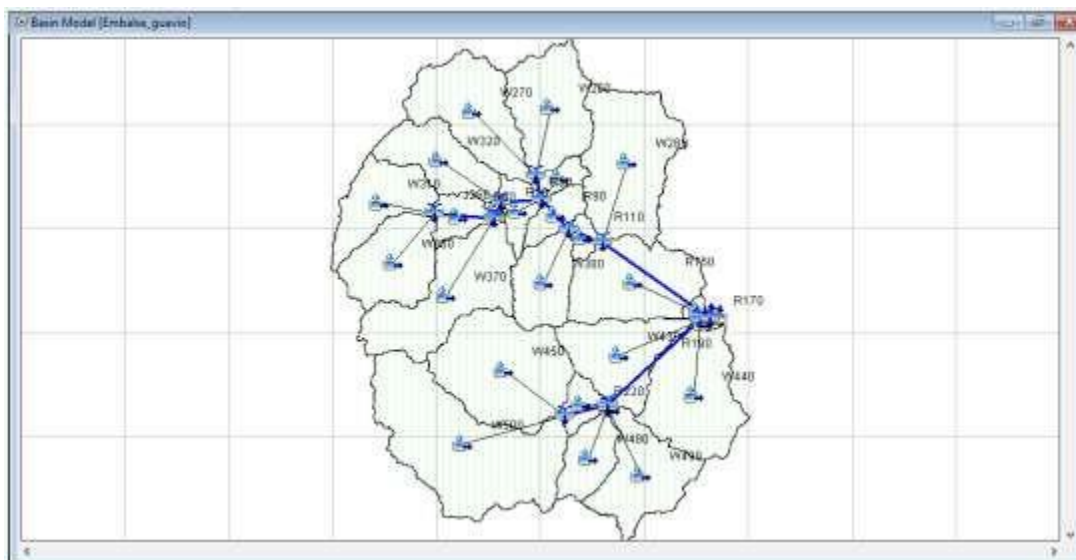
Fuente: Propia

4.5. HIDROGRAMA

Para la obtención del hidrograma se utilizó la herramienta computacional HEC-HMS, en la cual a partir de las cuencas generadas por ArcGIS y con los datos de precipitación obtenidos del IDEAM se obtiene la modelación del hidrograma para un periodo de retorno de 200 años.

En la Ilustración 32 Cuencas aferentes al embalse del Guavio en HEC-HMS se observa las cuencas generadas en ArcGIS exportadas a la herramienta computacional HEC-HMS.

Ilustración 32 Cuencas aferentes al embalse del Guavio en HEC-HMS



Fuente: Propia

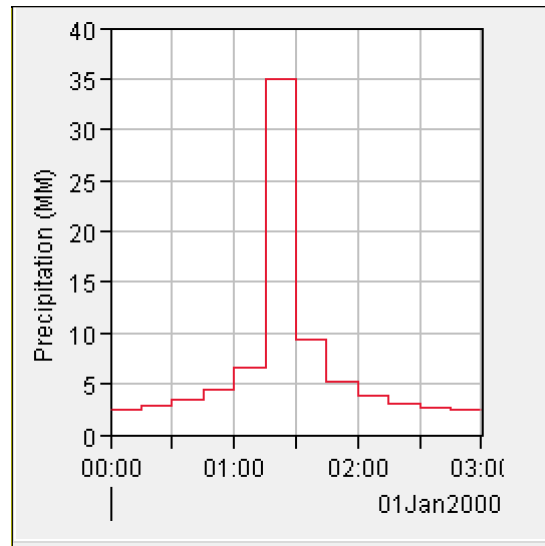
La cuenca del embalse del Guavio se subdivide en subcuencas, las cuales son nombradas en la Tabla 2 Subcuencas aferentes al Embalse del Guavio. con su respectiva área, CN, tiempo de retardo y tiempo de concentración.

Tabla 2 Subcuencas aferentes al Embalse del Guavio

Cuenca	CN	Area	Tiempo Retardo	Tiempo concentración
W500	60	168.55	248.58	414.30
W490	60	69.513	148.84	248.07
W480	60	34.127	105.27	175.45
W470	60	0.299	15.935	26.56
W460	60	15.516	61.597	102.66
W450	60	117.17	167.39	278.98
W440	60	92.573	155.96	259.93
W430	60	69.034	161.32	268.87
W420	60	1.777	65.835	109.73
W410	60	4.83	51.808	86.35
W400	60	86.406	178.31	297.18
W390	60	9.167	57.787	96.31
W380	60	45.376	130.16	216.93
W370	60	98.902	189.19	315.32
W360	60	64.066	145.92	243.20
W350	60	19.79	92.134	153.56
W340	60	2.951	31.552	52.59
W330	60	19.859	98.05	163.42
W320	60	52.525	158.4	264.00
W310	60	54.278	147.7	246.17
W300	60	18.459	122.31	203.85
W290	60	12.673	86.598	144.33
W280	60	110.18	169.08	281.80
W270	60	82.602	170.35	283.92
W260	60	77.107	142.19	236.98

La tormenta de diseño de cada subcuenca está asociada a la generada por cada estación de acuerdo a los polígonos de Thiessen. Estas tormentas de diseño se hicieron para una duración de tormenta de 3 horas divididas en intervalos de 15 minutos. Un ejemplo de tormenta de diseño se muestra en la Ilustración 33 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación AMOLADERO y corresponde a la estación AMOLADERO.

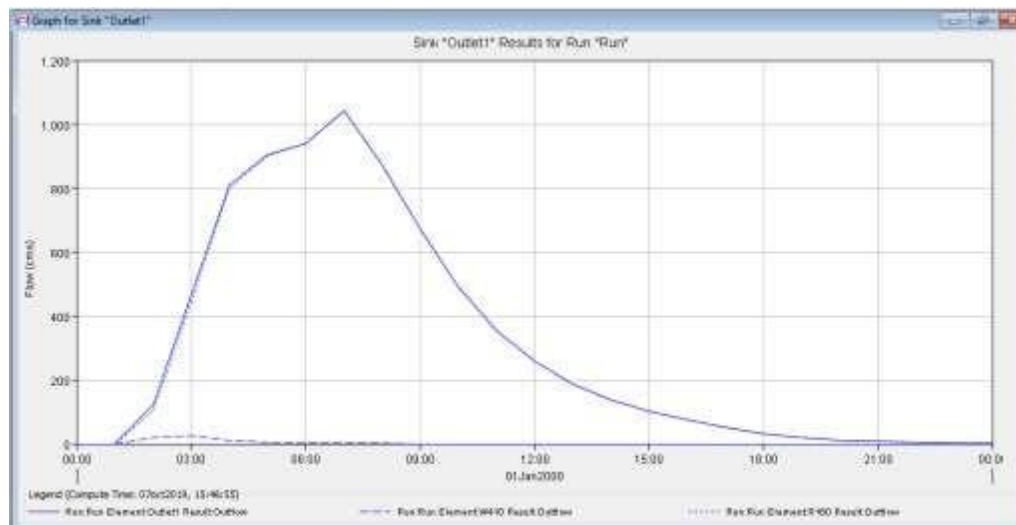
Ilustración 33 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación AMOLADERO



Fuente: Propia

En la Ilustración 33 Tormenta de diseño de duración 3 horas. Estación AMOLADERO se aprecia el hidrograma de respuesta de la cuenca analizada, nótese que el caudal pico es de 1043.5 m³/s, presentado a las 6 horas de iniciada la modelación, este importante caudal pico es el insumo para el diseño de la sección hidráulica óptima que garantice la estabilidad y adecuado funcionamiento de la hidroeléctrica del embalse del Guavio.

Ilustración 34 Hidrograma de respuesta para un periodo de retorno de 200 años



Fuente: Propia

En la Ilustración 34 Hidrograma de respuesta para un periodo de retorno de 200 años se muestra el hidrograma generado por la herramienta computacional HEC-HMS, en la cual se observa que el caudal generado en el punto de salida es de 1043.5 m³/s.

4.6. CURVA NÚMERO

El Número de Curva (CN) varía en un rango de 1 a 100, existiendo una función de las siguientes propiedades productoras de escorrentía de la cuenca hidrográfica: (1) tipo de suelo hidrológico, (2) utilización y tratamiento del suelo, (3) condiciones de la superficie del terreno, y (4) condición de humedad antecedente del suelo (INVIAS, 2009). Este valor se muestra en la Tabla 3 Parámetro CN (SCS) para tierras cultivadas y Tabla 4 Parámetro CN (SCS) para otras tierras agrícolas, el cual varía dependiendo del grupo de suelo hidrológico.

Tabla 3 Parámetro CN (SCS) para tierras cultivadas

COBERTURA		CONDICIÓN HIDROLÓGICA	GRUPO DE SUELOS			
USO DE LA TIERRA	TRATAMIENTO O PRÁCTICA		A	B	C	D
			NÚMERO DE CURVA			
Rastrojo	Hileras Rectas	---	77	86	91	94
Cultivos en hileras	Hileras Rectas	Mala	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
Leguminosas en ¹ hileras estrechas o forraje en rotación	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80

Fuente: tomado de Manual de Drenaje para Carreteras, 2009

Tabla 4 Parámetro CN (SCS) para otras tierras agrícolas

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE COBERTURA	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	NÚMERO DE CURVA PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS			
		A	B	C	D
Pastos, forraje para pastoreo ¹	Mala	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segados para heno	---	30	58	71	78
Maleza mezclada con pasto de semilla con la maleza como principal elemento ²	Mala	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Buena	30 ³	48	65	73
Combinación de bosques y pastos (huertas o granjas con árboles) ⁴	Mala	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques ⁵	Mala	45	66	77	83
	Regular	38	60	73	79
	Buena	30	55	70	77
Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes	---	59	74	82	86

Fuente: Manual de Drenaje para Carreteras, 2009

Cabe resaltar que, para realizar la modelación hidrológica del embalse del Guavio, se tomó como valor constante 60, puesto que en la mayor parte de la cuenca se encontraba suelo hidrológico B con una combinación de bosques y pastos

4.7. CURVA IDF

La intensidad de la tormenta se obtiene de las curvas de intensidad duración frecuencia (Curvas IDF). Son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno, para los cuales se usa el promedio de los valores máximos de precipitación en 24 horas. A partir de la metodología propuesta por Díaz-Granados y Vargas en 1998 para Colombia; la cual permite generar curvas IDF sintéticas para todo el país, presentando valores de intensidad por encima de los valores normales de las curvas IDF convencionales obtenidas a partir datos de precipitación en las estaciones pluviográficas. Es así como las curvas IDF sintéticas realizadas con esta metodología de amplia

implementación en el país, sirven al diseñador para realizar modelaciones hidrológicas e hidráulicas con un factor de seguridad considerable. En la Ecuación 4 se detalla la forma de la curva IDF utilizada, mientras que, en la Tabla 5 Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF, para Colombia se presentan los valores de los coeficientes a, b, c y d que varían de acuerdo a la región del país donde se encuentra la zona de estudio, en este caso parte la cobertura de la región R1 (Andina).

Ecuación 4

$$i = a \left(\frac{T^b}{\left(\frac{t}{60}\right)^c} \right) M^d$$

Donde

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h)

a, b, c y d: Son obtenidas de la Tabla 7, dependiente de la región.

M: Promedio del valor máximo anual de precipitación diaria, en milímetros (mm)

T: Periodo de retorno, en años.

t: Duración de la lluvia, en minutos (min)

Tabla 5 Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas intensidad-duración-frecuencia, IDF, para Colombia

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente: Manual de Drenaje del INVIAS

Ilustración 35 Regiones en Colombia para definición de parámetros a, b, c y d



Fuente: Manual de Drenaje INVIAS

Las curvas IDF generadas para cada estación se presentan a continuación:

Ilustración 36 Curva IDF sintética estación CLARAVAL



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 37 Curva IDF sintética estación GACHALA



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 38 Curva IDF sintética estación GACHETA



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 39 Curva IDF sintética estación GAMA



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 40 Curva IDF sintética estación JUNIN



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 41 Curva IDF sintética estación MINAS LAS



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 42 Curva IDF sintética estación POTRERITOS



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 43 Curva IDF sintética estación SUEVA



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 44 Curva IDF sintética estación TEMBLADARES



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 45 Curva IDF sintética estación UBALA



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 46 Curva IDF sintética estación AMOLADERO



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 47 Curva IDF sintética estación HATO GRANDE HACIENDA



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 48 Curva IDF sintética estación POTRERO LARGO



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 49 Curva IDF sintética estación TASAJERA



Fuente: propia para 200 años

Ilustración 50 Curva IDF sintética estación VEGA LA SAN JUAN



Fuente: propia para 200 años

4.8. PERIODO DE RETORNO

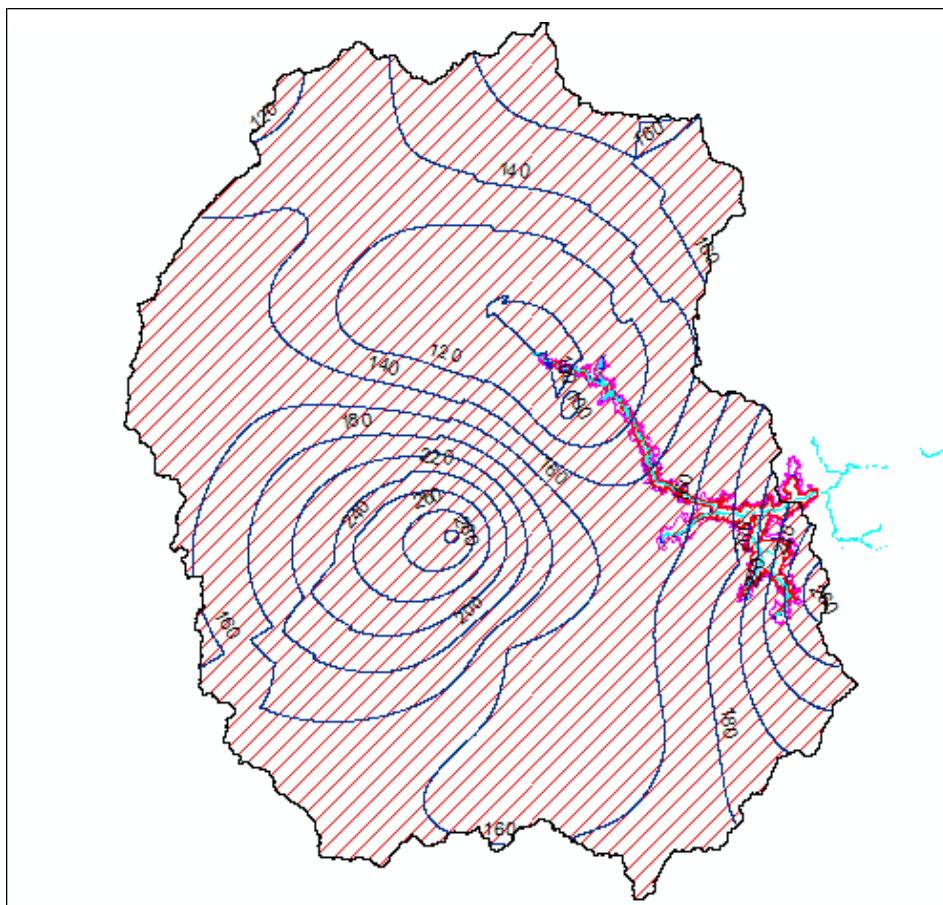
La escogencia del periodo de retorno de diseño de las estructuras hidráulicas obedece al nivel de vulnerabilidad e importancia de estas, es así, como se define un periodo de retorno general de 200 años.

4.9. ISOYETAS

Para la realización de las isoyetas se requirió la información del promedio precipitación media mensual obtenida por el IDEAM para las estaciones ya escogidas previamente. Así pues, con los datos de precipitación se procede a realizar el modelamiento de las isoyetas por medio del programa ArcGIS cada 20 milímetros, el cual toma como referencia el modelo propuesto por Kirig. El resultado de la modelación se muestra en la

Ilustración 51 Isoyetas generadas por el programa ArcGIS.

Ilustración 51 Isoyetas generadas por el programa ArcGIS

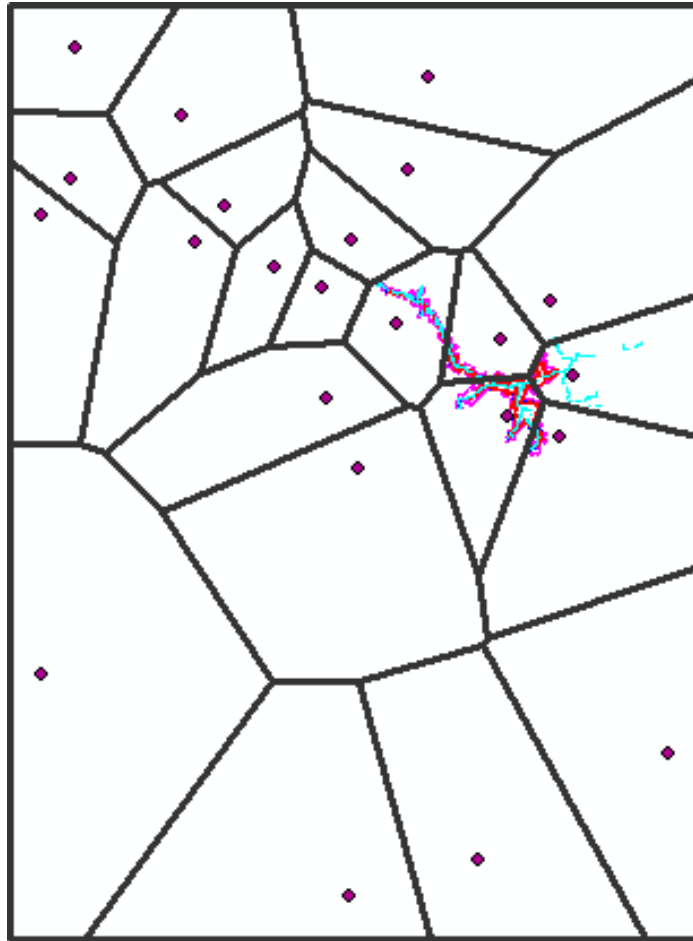


Fuente: Propia

4.10. POLÍGONO DE THIESSEN

Los polígonos de Thiessen Hacen referencia a área donde se precipita la misma cantidad de lluvia asociadas geoméricamente a una estación cercana. En la Ilustración 52 Estaciones aferentes al proyecto con el polígono de Thiessense muestra la ubicación de las estaciones con respecto al proyecto junto con el polígono de Thiessen generado.

Ilustración 52 Estaciones aferentes al proyecto con el polígono de Thiessen



Fuente: Propia

4.11. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico se realizó a partir de la información obtenida del IDEAM de promedio de precipitación mensual multianual y el promedio de temperatura mensual multianual. En este caso la estación más cercana al embalse del Guavio que presentaba datos de temperatura y precipitación es la estación GACHETA. En la Tabla 6 Balance hídrico del embalse del Guavio se muestra el balance hídrico obtenido para el embalse del Guavio.

Tabla 6 Balance hídrico del embalse del Guavio

	2019											
CAT	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PRECIPITACIÓN	28,6	48,4	73,6	134,9	165,9	154,0	152,2	117,4	95,3	113,9	97,6	45,1
TEMPERATURA	19,1	19,5	19,6	19,5	19,3	18,7	18,2	18,5	18,8	19,3	19,3	19,1
ETP	95,4	88,0	98,2	94,3	96,4	90,3	91,2	92,5	91,2	96,7	93,6	95,5
CAMBIO ALM	- 49,6	0,0	0,0	40,6	59,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	- 50,4
ALMACEN	0,0	0,0	0,0	40,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	49,6
ETR	78,2	48,4	73,6	94,3	96,4	90,3	91,2	92,5	91,2	96,7	93,6	95,5
DEFICIT	17,3	39,5	24,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ESCORRENTIA	0,0	0,0	0,0	0,0	10,1	63,7	60,9	25,0	4,1	17,2	4,1	0,0
DIAS DEL MES	31,0	28,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0
SI ALMACEN FUE DE 0	0,0	0,0										
SI ALMACEN FUE DE 100	33,1	0,0										
PP-RTP	- 66,9	- 39,5	- 24,6	40,6	69,5	63,7	60,9	25,0	4,1	17,2	4,1	- 50,4

Fuente: Propia

Según el balance hídrico obtenido podemos observar que los meses que presenta déficit el embalse del Guavio son los meses de Enero, Febrero y Marzo.

4.12. GENERACION DE CUENCAS

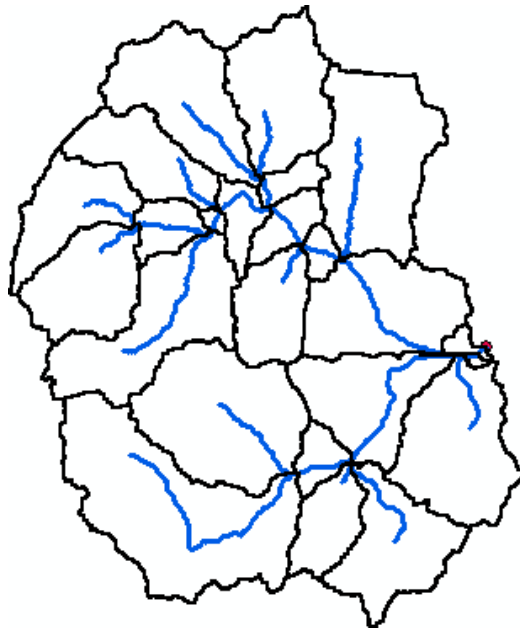
Mediante las extensiones de HEC-GeoHMS y Arc-Hydro Tools se procede a delimitar la cuenca y obtener de ella sus principales parámetros morfométricos, siguiendo en resumen los pasos siguientes:

- Generación de Hidro-DEM.
- Llenado de datos faltantes del Hidro-DEM.
- Generación de dirección del flujo.
- Hallar la acumulación de flujo.
- Generación de líneas de drenaje.
- Delimitación de cuencas en formato raster y shape.

- Definir los parámetros fisiográficos de cuencas (área, perímetro, pendiente, longitud del cauce principal).
- Estimar tiempo de concentración.

En la Ilustración 53 Cuencas generadas por el programa ArcGIS se muestra las cuencas generadas por el programa.

Ilustración 53 Cuencas generadas por el programa ArcGIS



Fuente: Propia

4.13. CURVA DE CALIBRACIÓN

La curva de calibración de caudales es el resultado de los diferentes aforos que se realizan durante un periodo de tiempo, esta crea una relación entre el caudal y el nivel del agua en un tramo de un cauce.

El objetivo es que los foros sean a un largo periodo de tiempo para que esto se ajuste a la realidad, teniendo caudales minimos y máximos que también se ajusten a la realidad, de esta manera la curva de calibración se ajustara de la mejor amanaera al comportamiento del cauce.¹³

¹³ [En línea]. Disponible en Internet: <URL> [Citado: 14 de octubre, 2019].

Ecuación 5 Curva de Calibración

$$Q = K*(H - H_0)^b$$

Donde:

Q = Caudal

K y b = Son parametros de ajuste

H₀ = Nivel al cual el caudal es cero

H = Nivel del agua

4.14. EVOTRANSPIRACIÓN

Fenómeno físico que marca un cambio en el estado del agua este pasa de líquido a vapor, también incluye los procesos de sublimación que se dan cuando el agua forma nieve o hielo y pasa directamente a vapor si pasar por el estado líquido.

La evaporación se da desde la superficie del suelo y la vegetación desde que sucede la precipitación. Debido a las temperaturas, a la acción de la radiación solar o al viento, las gotas de agua que habían precipitado, acaban evaporándose.

La transpiración es un fenómeno biológico que tiene lugar en las plantas. Es el proceso por el que pierden agua y la vierten a la atmósfera. Estas plantas cogen agua a través de las raíces desde el suelo. Parte de esta agua sirve para su crecimiento y funciones vitales y la otra parte lo transpiran a la atmósfera.

Como estos dos fenómenos son difíciles de medir por separado, se realizan juntos como la evapotranspiración. Se necesita saber la cantidad total de agua que se pierde en la atmósfera. Estos datos se necesitan para hacer balances hídricos de la cantidad de agua que cae en relación con la que se pierde. El resultado será un balance neto positivo, si se acumula agua o tenemos excedente de recursos, o negativo, si perdemos agua acumulada o perdemos recursos.

La evapotranspiración es considerada como elemento importante pensando en las necesidades hídricas que tienen los cultivos para que se puedan desarrollar correctamente.¹⁴

Ilustración 54 Valores de Evapotranspiración

Subcuenca	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	IT	ET _{real}
Monquentiva	1167,7	14,5	814,93	679,7
Amoladero	1167,7	15,5	814,93	716,3
Sueva	1167,7	15	814,93	699,22

Fuente: CAR

4.15. ANALISIS DE CAUDALES

El caudal obtenido para este proyecto fue realizado a través de las herramientas computacionales ArcGIS y HEC-HMS, los cuales a través de información secundaria de entidades gubernamentales tales como SIAC, IDEAM, IGAC, se pueden realizar cálculos hidrológicos para tener un caudal aproximado del embalse. Este caudal generado se basó en la metodología propuesta por el SCS (Soil Conservation Service), en el cual se necesita como insumos para su desarrollo las áreas de las subcuencas generadas, el valor CN correspondiente a las subcuencas y el tiempo de concentración. Para el cálculo del tránsito de hidrogramas se utilizó la metodología propuesta por Muskingum-Cunge, donde se requiere el coeficiente Manning del río, la base del río, la pendiente y la forma.

El resultado obtenido de caudal es un valor aproximado al que se pueda presentar en la realidad, puesto que todos los insumos requeridos para alimentar los programas computacionales fueron producto de información secundaria y esto afecta el resultado final del estudio, que en este caso es el caudal. Para poder realizar un análisis más correcto y acertado del embalse es necesario efectuar estudios puntuales sobre el embalse como determinar la forma topográfica de los ríos que alimentan al embalse, un estudio de suelos realizando apiques que permiten determinar el valor CN del sitio, estaciones limnimétricas que permitan determinar el nivel de agua a través del tiempo, etc. para así poder generar insumos de primera mano que ayuden a obtener un caudal mas cercano a la realidad.

¹⁴ [En línea]. Disponible en Internet: <URL> [Citado: 14 de octubre, 2019].

4.16. AJUSTE DE DATOS

El ajuste de datos se realizó teniendo en cuenta la toma y muestras de las de datos registradas en estaciones pluviales encontradas en la cercanía al embalse del Guavio (véase Tabla 1), los cálculos que se desprendieron después de estos se ajustaron teniendo incertidumbres consultadas en los textos de apoyo expuestos en la bibliografía.

4.17. CURVAS DE GASTO

Las curvas de gasto, son herramientas hidrológicas que muestran la relación cota de nivel de agua y el caudal generado en dicha cota por el tramo que se estudia del río. Se utilizan para calcular el caudal medio diario a partir de datos tomados sobre la escala limnimétricas de las estaciones que se encuentren en la zona. La relación de las variables se hace a partir de datos altura vs caudal, obtenidos de los aforos, la precisión de los caudales diarios depende de la sección y la cantidad de aforos realizados en la región.¹⁵

4.18. COTA TOTAL DE SEDIMENTACIÓN

Para tener una certeza de la altura total de sedimentación que actúa en el embalse en estos momentos es difícil de concluir ya que no se encuentran estudios recientes.

5. ANÁLISIS HIDRÁULICO

La modelación se realiza con el programa llamada EPANET, que sirve para analizar la distribución en sistemas de agua potable, resolviendo el sistema con la ecuación de Darcy-Weisbach, o, Chezy-manning, o, Hazen-Williams. Este programa solo sirve para resolver sistemas a presión, teniendo en cuenta parámetros como calidad del agua, o diferentes temperaturas.

¹⁵Juan León, Frederique Seyler, Astrid Puerta. Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat sobre el cauce principal del río el cauce principal del río Orinoco [En línea]. Disponible en Internet: <URL> [Citado: 14 de octubre, 2019].

5.1. DÉFICIT DE AGUA

Según lo observado en el balance hídrico se tiene que los meses que el embalse presenta déficit son enero, febrero y marzo, por lo cual el diseño hidráulico debe ir orientado a suplir la necesidad de caudal que requiere el embalse del Guavio en estos meses.

5.2. DISEÑO DE TUBERÍA DE LAGO A EMBALSE

De acuerdo a lo obtenido en el balance hídrico, se diseña bajo la condición más crítica, que es cuando el embalse del Guavio presenta el mayor déficit, en cuyo caso es en el mes de febrero con un déficit de 39.5 mm, por lo que convertido a intensidad en una duración de tormenta de 3 horas nos da un valor de 13.2 mm/h. Para el coeficiente de escorrentía se supone un suelo ondulado de pasto franco limo arcilloso, obteniendo un valor de 0.30. Así pues, utilizando la ecuación del método racional se obtiene un caudal de

$$Q=0.278 \cdot C \cdot i \cdot A$$

$$Q=0.278 \cdot 0.30 \cdot 13.2 \text{ mm/h} \cdot 4.8 \text{ Km}^2$$

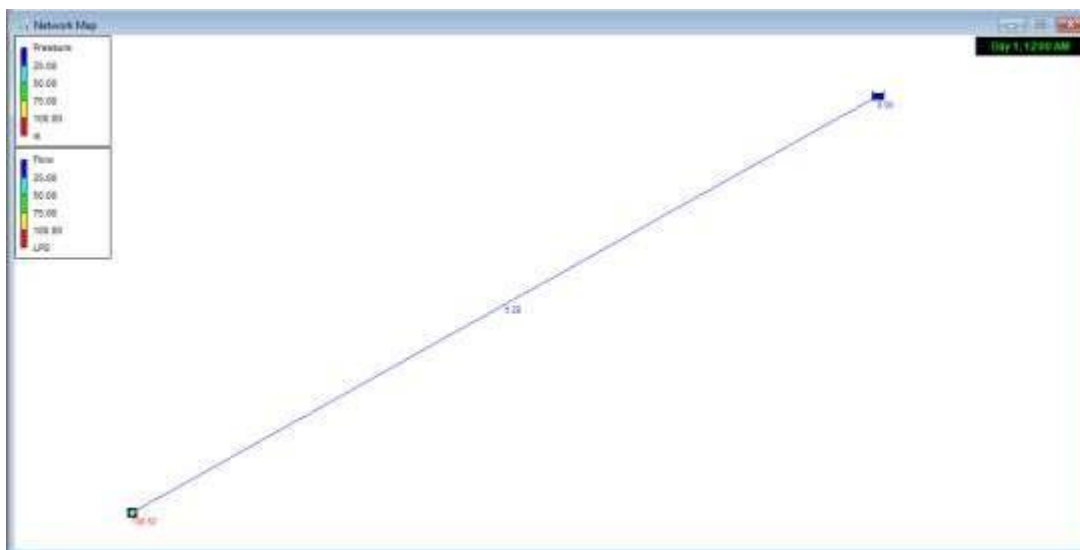
$$Q=5.28 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo cual la tubería a diseñar debe ser capaz de transportar como mínimo 5.28 m³/s.

Para realizar el diseño de la tubería se usa la herramienta computacional epanet, la cual permite realizar diseños de tubería a presión con la ecuación de Darcy-Weisbach.

Teniendo como base que la tubería a utilizar es en pvc con un coeficiente de rugosidad de 0.0015mm y un diámetro de 4", con pérdidas por salida, entrada, válvula mariposa y válvula de cheque, y una altura del lago artificial de 1900 metros y una altura del embalse del Guavio de 1791 metros, se obtiene que al llevar este caudal de 5.28 m³/s se tiene una presión aguas abajo de 108 metros, como se observa en la Ilustración 55 Caudal y presión aguas abajo en el embalse del Guavio.

Ilustración 55 Caudal y presión aguas abajo en el embalse del Guavio



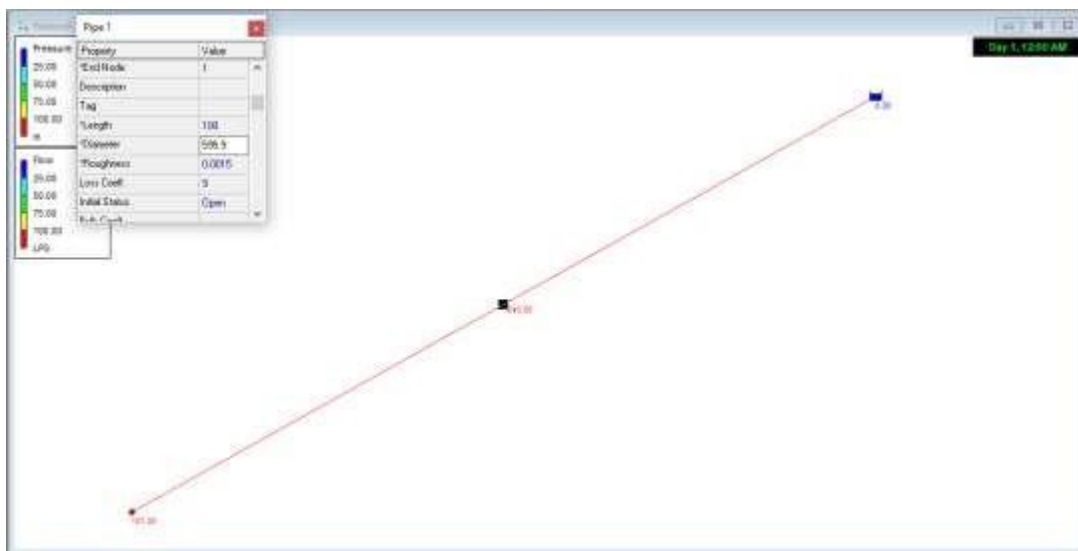
Fuente: Propia

De acuerdo a lo obtenido en el balance hídrico, se diseña bajo la condición más crítica, que es cuando el embalse del Guavio presenta el mayor déficit, en cuyo caso es en el mes de febrero por lo que el almacenamiento es 0, y el lago artificial necesita suplir el caudal de 1043.50 hallado a partir de la modelación en HEC-HMS previamente presentado. Para realizar el diseño de la tubería se usa la herramienta computacional epanet, la cual permite realizar diseños de tubería a presión con la ecuación de Darcy-Weisbach.

Teniendo como base que la tubería a utilizar es en pvc con un coeficiente de rugosidad de 0.0015mm y un diámetro de 24", con pérdidas por salida, entrada, válvula mariposa y válvula de cheque, y una altura del lago artificial de 1900 metros y una altura del embalse del Guavio de 1791 metros, se obtiene que al llevar este caudal de 1043.50 m³/s se tiene una presión aguas abajo de 101.35 metros, como se observa en la

Ilustración 56 Caudal y presión aguas abajo en el embalse del Guavio.

Ilustración 56 Caudal y presión aguas abajo en el embalse del Guavio

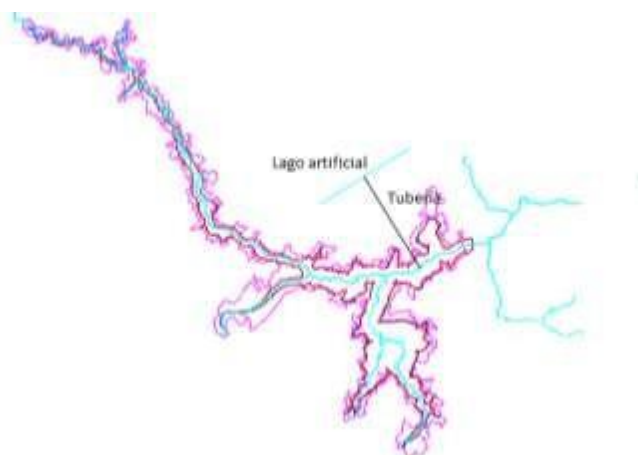


Fuente: Propia

De lo anterior se puede concluir que con un lago artificial que se encuentre a una altura de 1950 m.s.n.m. y una tubería en PVC de 24" se puede alimentar al embalse cuando esté presente déficit.

En la Ilustración 57 Lago artificial para alimentar al embalse del Guavio se puede apreciar el lago artificial que alimenta al embalse del Guavio.

Ilustración 57 Lago artificial para alimentar al embalse del Guavio



Fuente: Propia

6. COMPARACION DEL SISTEMA DEL LAGO GATUN CON SISTEMA A IMPLEMENTAR

El Lago Gatún fue diseñado con el fin de alimentar con agua dulce el canal de Panamá para facilitar el paso de los barcos de un océano a otro, el proceso de alimentar el canal cuenta con un ciclo en el cual parte del agua regresa al lago esto con el fin de equilibrar las masas de agua.

Para el sistema que se pretende implementar, a través del lago artificial es el de alimentar el embalse de la hidroeléctrica del Guavio realizando así un equilibrio de la cota máxima de llenado del embalse que se ve afectada tanto por acciones climatológicas y sedimentación del mismo. Se encuentran similitudes con el anterior mencionado lago Gatún ya que los dos son diseñados con el fin de alimentar otro proyecto.

7. CONCLUSIONES

Se puede concluir que la visita técnica ayudó a adquirir conocimientos, el poder ver un proyecto de tal envergadura ayuda a idear la forma como se pueden aplicar esas nuevas tecnologías en los proyectos nacionales. De este modo, es totalmente necesario que los futuros ingenieros amplíen su intelecto por medio de estas visitas.

Como se puede evidenciar en el diseño presentado, se pueden presentar déficit de caudales en los primeros meses del año, por tal motivo es pertinente implementar un lago artificial que lo alimente, para generar mayor aprovechamiento de este recurso que es de vital importancia en algunas regiones del país.

El uso de un lago artificial en el embalse del Guavio ayudaría a mantener los niveles óptimos de agua para la operación de la Hidroeléctrica. Sin embargo, la inversión económica es considerable, por lo cual se debe generar un estudio económico del proyecto para evaluar su factibilidad.

Conforme los cálculos efectuados, se comprueba que técnicamente el proyecto presentado es viable.

8. BIBLIOGRAFÍA

Canal de Panamá (electrónico) [06-03-2019]. Disponible en <https://bit.ly/2GV4Uws>

Arana Ronald. Las herencias del Guavio (electrónico) (1997) [18-03-2019]. Disponible en <https://bit.ly/2FEExHP>

La eficiencia técnica como un nuevo criterio de optimización para la generación hidroeléctrica a corto plazo. (Electrónico) [13-03-2019]. Disponible en <https://bit.ly/2CPPZjb>

Hidroeléctricas en Colombia: entre el impacto ambiental y el desarrollo. (Electrónico) [11-03-2019]. Disponible en <https://bit.ly/2JvxR2P>

Funciones de embalse. (Electrónico) [8-03-2019]. Disponible en <https://bit.ly/2xcJJiS>

Lago Gatún (electrónico) [8-03-2019]. Disponible en <https://bit.ly/2JUzclb>

Lagos Artificiales (Electrónico). [22-04-2019] Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/alma-migens/los-embalses-mas-grandes-del-mundo>.

Lake and Reservoir Management. 1997-04; volume 13. Collection Taylor & Francis Science & Technology Library

SPE Reservoir Engineering. 1986-1997; volume 1. Collection OnePetro (Uniandes).

SPE Reservoir Evaluation & Engineering. 1997; volume 1. Collection (Uniandes)

El desafío de los lagos artificiales de centrales hidroeléctricas (Electrónico). [22-04-2019]. Disponible en: <https://www.americaeconomia.com/analisis-opinion/el-desafio-de-los-lagos-artificiales-de-centrales-hidroelectricas>.

Guidelines for Artificial Lakes. Before construction, maintenance of new lakes and rehabilitation of degraded lakes. (Electrónico). [23-04-2019]. Disponible en: <http://www.envirolink.govt.nz/assets/Envirolink/Guidelines-for-artificial-lakes.pdf>.

Natural vs. Artificial Lakes. (Electrónico). [23-04-2019]. Disponible en:
<http://www.princetonhydro.com/blog/natural-vs-artificial-lakes/>.

Artificial Lake in world. (Electrónico). [23-04-2019]. Disponible en:
<https://www.lakehomes.com/info/articles-and-news/5-of-the-worlds-largest-man-made-lakes>.

Artificial Lake. (Electrónico). [23-04-2019]. Disponible en:
<https://www.worldlistmania.com/top-largest-man-made-lakes-world/>

Lake Kariba. (Electrónico). [23-04-2019]. Disponible en:
<https://face2faceafrica.com/article/this-man-made-lake-is-the-largest-in-the-world-and-its-in-africa>.

Muñoz Nicole, Mayorca Maria. Aplicación de metodologías para la estimación de la eficiencia de atrapamiento de sedimentos en los embalses colombianos: Betania, Miel I y Urra I. (PDF) 1 (2017) [18-03-2019]

Estimación de la eficiencia de retención del embalse. (PDF) 1 [20-03-2019]

Tyrantia, L. (1992). La evolución de los lagos artificiales: el impacto ecológico de la Presa Miguel Alemán. *Alteridades*, 2 (4). Recuperado desde:
<http://biblioteca.ues.edu.sv/revistas/10800273-11.pdf>

Jørgensen S.E., Löffler H., Rast W., Straškraba M. Lake and Reservoir Management. *Developments in Water Science*, (54) Recuperado desde:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016756480580022X>

González M, Cruz J, Lagos artificiales: elementos paisajísticos como infraestructura hidráulica. *Arquitectura y Urbanismo*, 34 (3) Recuperado desde:
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-58982013000300004.

Brookes, J.D, Hamilton, D.P. (2009). Lakes and Reservoirs of Australia and New Zealand. *Encyclopedia of Inland Waters*. Recuperado desde:
<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/artificial-lake/pdf>.

Ramdani, M, Flower, R.J. (2009). Lakes of Africa: North of Sahara. *Encyclopedia of Inland Waters*. Recuperado desde:
<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/artificial-lake/pdf>.

Bergoeing, J. (2015). Geomorphological Characteristics of Panama. *Geomorphology of Central America*. Recuperado desde: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012803159900008X>

CAR. (2019) Documento técnico del Guavio. Recuperado desde: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac281a580e30.pdf>

León Juan, Seyler Frederique, Puerta Astrid. (2011). Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat sobre el cauce principal del río el cauce principal del río Orinoco. Recuperado desde: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v31n3/v31n3a10.pdf>

Palacios Sierra Ricardo Andrés. (2013). inventario documentado de represas en Colombia. Recuperado desde: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11360/PalaciosSierraRicardoAndres2013.pdf;jsessionid=C25F1900B7A298243CDBB1A61248D9A9?sequence=1>

Karen X. Gutiérrez Hernández
Código
504580

Benjamín A. Franco Salazar
Código
502309

Henry Alberto Córdoba Romero

FECHA
(13/10/2019)